

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto

Puunjalostustekniikan laitos

JUHA POUSI

FLOTAATIOKEMIAN TARKASTELU HYDROSYKLONIN
TYYPPISESSÄ MUSTEENPOISTOSSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 30.5.1994

Työn valvoja: Professori Johan Gullichsen

Työn ohjaaja: DI Soile Peltonen

Tekijä, työn nimi: Juha Pousi
Flotaatiokemian tarkastelu hydrosyklonin tyyppisessä
musteenpoistossa

Päivämäärä: 30.5.1994

Sivumäärä: 102

Osasto, laitos, professuuri:

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto / puunjalostustekniikan laitos /
selluloosatekniikka

Työn valvoja:

Professori Johan Gullichsen

Työn ohjaaja:

DI Soile Peltonen

Diplomityön tavoitteena oli selvittää hydrosyklonin tyyppisen musteenpoistolaitteiston vaahdotuskemialle asettamia vaatimuksia.

Kirjallisuusosassa perehdyttiin yleiseen siistausprosessiin, käytettyihin laitteisiin ja erityisesti vaikuttavaan prosessikemiaan. Suurinta huomiota kiinnitettiin siistauksessa esiintyvien pinta- ja kolloidikemiallisten ilmiöiden tarkasteluun prosessin eri vaiheissa ja todettiin niiden olevan siistauksen tehokkuuden kannalta merkittävimpiä tekijöitä.

Kokeellisessa osassa tutkittiin erityyppisten vaahdotuskemikaalien, kuten rasvahappojen, emulsioiden sekä täysin synteettisten aineiden toimintaa koelaitteeksi valitussa GSC-hydrosyklonissa. Kokeet ajettiin esikokeiden perusteella vakioituissa olosuhteissa. Ajoparametrien ollessa kaikissa koeajoissa samat, pystyttiin kemikaaleja vertailemaan keskenään ja asettamaan niiden vaikutusmekanismit GSC:n toiminnan kannalta paremmuusjärjestykseen.

Kokeet osoittivat rasvahappojen kokoojaominaisuuksien olevan erinomaiset ja niiden todettiin parantavan koelaitteen musteenpoistotehokkuutta huomattavasti. Synteettiset pinta-aktiiviset aineet vaikuttivat puolestaan muita enemmän pintajännityksiin ja muodostivat runsaan vaahdon, jonka havaittiin olevan myös yhteydessä laitteen musteenpoistotehokkuuteen. Saadut tulokset osoittavat, että hydrosyklonin tyyppisen musteenpoistolaitteiston toimintaan vaikuttavat suuresti käytetyn vaahdotuskemikaalin kokoojaominaisuudet sekä kemikaalin stabiloiman vaahdon runsaus. Todennäköisesti parhaaseen tulokseen päästään kemikaaliyhdistelmillä, joissa nämä ominaisuudet on optimoitu.

Laitteen toimintaa mallinnettaessa todettiin siinä vaikuttavalla keskipakovoimakentällä olevan suurin merkitys epäpuhtauspartikkelien erottumiseen kuitususpensiosta. Erottuminen perustuu pienten ja kevyiden partikkelien kulkeutumiseen massapyörteen sisäkehälle ja sitä kautta rejektijakeeseen. Optimaalisessa tapauksessa vaahdotuskemikaalit ja keskipakovoimakentän vaikutus täydentävät toisiaan, jolloin partikkelien kulkeutuminen massapyörteen läpi on tehokkaimmillaan.

Varsinaisissa koeajoissa saadut tulokset jäivät selvästi heikommiksi, kuin laitteella ajettut esikokeet antoivat odottaa. Tästä syystä tehtiinkin koeajojen jälkeen lisäkokeita, joissa pyrittiin simuloimaan esikokeissa vallinneita olosuhteita. Lisäkokeissa saadut erinomaiset tulokset osoittivat laitteen musteenpoistotehokkuuden paranevan huomattavasti vaahdotuksen prosessiolosuhteita optimoitaessa.

Author and name of the thesis: Juha Pousi

A Study of Flotation Chemistry in a Hydrocyclone
Type of Flotation

Date: 30.5.1994

Number of pages: 102

Faculty, Department, Professorship:

Faculty of Process Engineering and Materials Science /
Department of Forest Products Technology / Pulp Technology

Supervisor:

Professor Johan Gullichsen

Instructor:

M. Sc. Soile Peltonen

The purpose of this study was to find out what kind of chemical properties flotation chemicals should have in a hydrocyclone type of flotation.

The first part of this work dealt with the flotation process in general, equipment used in it and particularly the chemistry of the process. Attention was paid to studying the surface and colloidal effects involved in different parts of the process and it was noted that their influence on the efficiency of flotation is significant.

In the second part the operating efficiency of different types of flotation chemicals like fatty acid-based soaps, emulsions and synthetic surfactants were studied under the operating conditions of a GSC hydrocyclone. Preliminary tests were run in order to find optimized operating conditions for the GSC and these parameters were used for testing the different flotation chemicals. The operating parameters being the same in all of these trials the chemicals and their effects on the operating efficiency of the GSC could be compared.

The trials showed that the collector properties of fatty acid-based soaps are excellent and they improved the ink particle removal efficiency of the GSC. Synthetic tensides had the strongest effect on the surface tensions and they produced a very heavy and stable foam which also affected the ink removal efficiency. It is clear that the hydrocyclone type of flotation should be operated under conditions in which the flotation chemicals have good collector properties and foaming is very heavy. The best results are most probably achieved with chemical combinations where these properties are optimized.

The centrifugal force inside a hydrocyclone has a strong effect on separation of lightweight contaminants from the fiber suspension. Due to the separative force, small and light particles travel to the centre of the hydrocyclone and are rejected from the reject opening at the top of the cyclone. In an optimized situation the flotation chemistry and the centrifugal force complement each other resulting in most efficient contaminant removal capacity of a hydrocyclone.

In the trials with different deinking chemicals the operating efficiency of the GSC wasn't as good as it was in the preliminary tests. Because of this one more trial was run where the operating conditions of the preliminary tests were simulated. This trial gave excellent results and proved that the ink particle removal efficiency of the GSC can be improved by optimizing the operating conditions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty A. Ahlströmin kuituprosessit-yksikössä ja Ahlström Machineryn tutkimuskeskuksessa Karhulassa 1.9.1993 - 13.5.1994 välisenä aikana. Tämän lisäksi ajettiin suurin osa työhön liittyneistä esikokeista kesän 1993 aikana Keräyskuitu Oy:n tiloihin asennetulla koelaitteistolla.

Työn ohjaajaa diplomi-insinööri Soile Peltosta ja valvojaa professori Johan Gullichsenia haluan kiittää innostuneesta ja kannustavasta suhtautumisesta sekä kaikesta avusta ja neuvoista, joita heiltä sain työni eri vaiheissa.

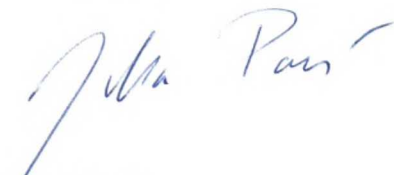
Haluan kiittää myös professori Per Steniusta työssä vaikuttaneeseen pintakemiaan liittyneistä asiantuntevista kommentteista ja neuvoista. Samoin lämmin kiitos koko puun fyysis-kemialisen kemian laboratorion henkilökunnalle heidän työtäni kohtaan osoittamastaan mielenkiinnosta ja avusta, mitä heiltä sain.

FFRC:n henkilökuntaa kiitän saamastani runsaasta avusta, joka nopeutti työni valmistumista huomattavasti.

Työtovereitani kiitän kaikista heidän kommentteistaan ja neuvoistaan sekä erityisesti työajan ulkopuolella tapahtuneesta toiminnasta, joka oli tervetullutta vaihtelua ja usein oivallinen keino patoutumien purkamiseen.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani heidän kannustavasta ja ymmärtäväisestä asenteestaan koko opiskeluni aikana.

Karhulassa 30.5.1994



Juha Pousi

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puunjalostustekniikan laitos
Kirjasto

KIRJALLISUUSOSA

1. JOHDANTO	1
2. SIISTAUS	2
3. SIISTAUKSEN OSAPROSESSIT	2
3.1 Pulpperointi	3
3.2 Massan esipuhdistus	5
3.3 Vaahdotus	6
3.4 Massan jälkipuhdistus	9
3.5 Saostus	10
3.6 Dispergointi	10
3.7 Valkaisu	11
3.8 Jälkisiistaus	12
3.9 Massan kuivaus ja pakkaus	12
4. SIISTAUKSESSA KÄYTETYT KEMIKAALIT	12
5. PULPPERIKEMIA	13
5.1 Natriumhydroksidi ja -karbonaatti	14
5.2 Vetyperoksidi	15
5.3 Kompleksinmuodostajat	16
5.4 Natriumsilikaatti	18
5.5 Pinta-aktiiviset aineet	18
5.5.1 Saippua	18
5.5.2 Synteettiset tensidit	20
5.5.3 Kriittinen misellin muodostus konsentraatio (cmc)	23

5.5.4 Sameuspiste	25
5.5.5 HLB-arvo (Hydrophilic-Lipophilic Balance)	26
5.5.6 Pinta-aktiivisten aineiden toiminta pulpperoinnissa	27
 6. VAAHDOTUSKEMIA	 30
6.1 Kokoojat	30
6.1.1 Rasvahappopohjaiset kokoojat	31
6.1.2 Synteettiset kokoojat	33
6.1.3 Semisynteettiset kokoojat	35
6.2 Vaahdonmuodostus	36
 7. BIOLOGISET SIISTAUSMENETELMÄT	 39
 8. VAAHDOTUSTEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	 40
8.1 Partikkelikoko	40
8.2 Partikkelin ja ilmakuplan välinen kontaktikulma	44
8.3 Dispergoitujen mustepartikkelien ja kalsiumsaippuan saostuminen kuituihin	46
8.4 prosessimuuttujien vaikutus	48
 9. VALKAISU	 50

KOKEELLINEN OSA

10. TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET	51
10.1 GSC-hydrosykloni	51
10.2 Työn tavoitteet	53
11. KOKEIDEN SUORITUS	53
11.1 tutkimuksissa käytetyt GSC-hydrosyklonit	53
11.2 Esikokeet	54
11.2.1 Massavirtaus ja syöttösakeus	54
11.2.2 Rejektisuhde ja ilmakerroin	55
11.2.3 Yhteenveto esikokeista	57
11.3 Koesuunnitelma	58
11.3.1 Raaka-aine	58
11.3.2 Virtausjärjestelyt tutkimuskeskuksessa	58
11.3.3 Tutkitut kemikaalit	60
11.3.4 Näytteiden otto ja käytetyt analyysimenetelmät	63
12. KOEAJOJEN OLOSUHTEET	65
13. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	67
13.1 Vaaleus ja akseptisuodoksen likaisuus	68
13.2 Erikokoisten partikkelien erotustehokkuus	71
13.3 Orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen rejektoituminen	75
13.4 Tahmo-analyysi	77
13.5 Kuidunpituus ja Canadian Freeness-luku	77
14. LIUOSTEN PINTAJÄNNITYKSET	81
15. LABORATORIOVAAHDOTUS OUTOKUMPU-KENNOLLA	84

16. GSC:N TOIMINNAN MALLINTAMINEN	86
17. JATKOTOIMENPITEITÄ	92
18. YHTEENVETO	93
19. LÄHDELUETTELO	97

LIITTEET

11 kappaletta

1. JOHDANTO

Keräyspaperista on viime vuosina muodostunut merkittävä kuituraaka-aine paperitehtaille ympäri maailman. Syynä tähän ovat olleet kasvaneet ympäristönsuojelulliset paineet sekä kelvollisen raaka-aineen puute tai korkea hinta, jotka ovat pakottaneet paperitehtaat lisäämään uusiomassan käyttöä neitseellisen kuidun rinnalla. Kasvanut kysyntä on lisännyt myös vaatimuksia entistä korkeampilaatuisesta uusiomassasta, jota voitaisiin käyttää yhä useampien paperilaatujen raaka-aineena.

Siistausprosessi perustuu pitkälti erilaisten pintojen, kuten kuitujen ja partikkelien, erilaisiin pintakemiallisiin ominaisuuksiin. Näitä ominaisuuksia muuttamalla saadaan aikaan kussakin prosessin vaiheessa haluttu vaikutus, kuten partikkelien dispergoinnin edistäminen pulperoinnissa ja tarttuminen ilmakupliin vaahdotuksessa.

Työn kirjallisuusosassa pyrittiin selvittämään vaahdotussiistauksen osaprosesseja sekä niissä vallitsevia kemiallisia olosuhteita. Uusiomassan varsinainen musteenpoisto tapahtuu juuri vaahdotuksessa, mutta massan laadun kannalta ovat myös muut prosessin vaiheet tärkeitä. Niihin liittyvällä prosessikemialla on myös yhteys vaahdotuskemiaan, jonka vuoksi työssä tarkasteltiin koko uusiomassaprosessin kemiaa keskittyen kuitenkin niihin alueisiin, jotka ovat prosessin kannalta ongelmallisimmat.

Työn kokeellisessa osassa vertailtiin erilaisten siistauskemikaalityyppien toimintaa vakioiduissa olosuhteissa hydrosyklonin tyypisessä musteenpoistolaitteistossa. Koelaitteena käytettiin GSC-hydrosyklonia (Gas Sparged Cyclone) ja kokeiden avulla pyrittiin löytämään GSC:n olosuhteisiin parhaiten sopivat siistauskemikaalityypit, sekä selvittämään millaisia ominaisuuksia niiltä vaaditaan. Teoreettisin pohdinnoin pyrittiin arvioimaan GSC:n toimintaan vaikuttavien pinta- ja kolloidikemiallisten ilmiöiden merkitystä.

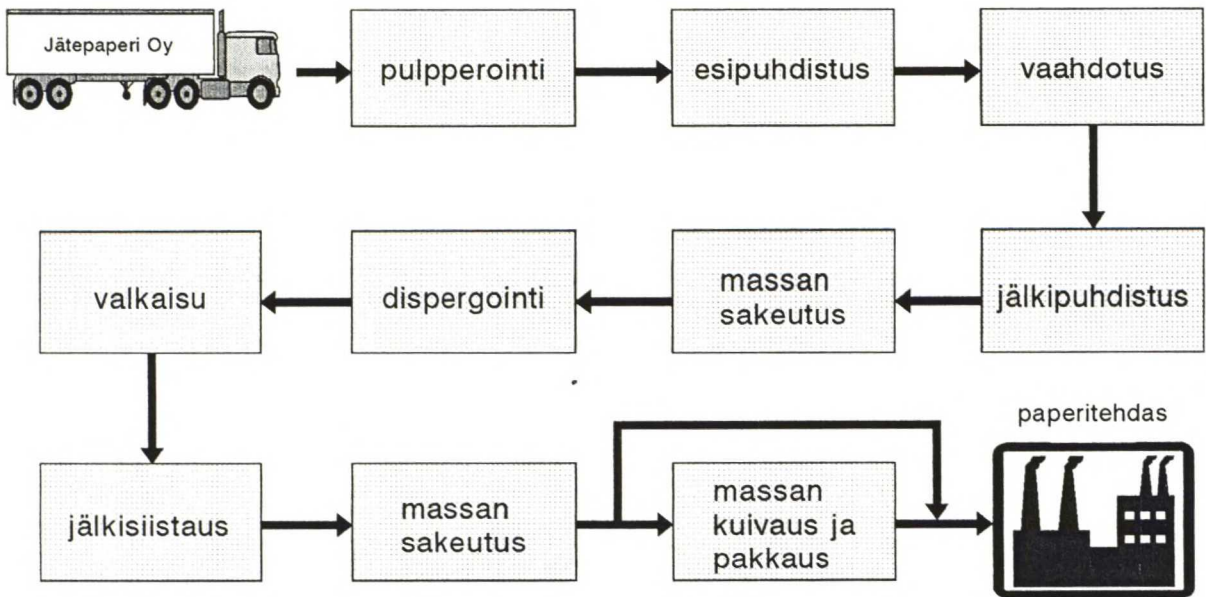
2. SIISTAUS

Prosessia, jossa keräyspaperista valmistetaan käyttökelpoista uusiomassaa kutsutaan siistaukseksi /1/. Siistauksessa keräyspaperia käsitellään sekä mekaanisin että kemiallisin menetelmin. Tarkoituksena on ensinnäkin kuiduttaa paperi, irroittaa painoväripartikkelit kuiduista ja estää niiden uudelleen kiinnittyminen sekä lopuksi poistaa painoväripartikkelit massasulpusta joko pesemällä tai vaahdottamalla /2/. Siistatun uusiomassan käyttö edellyttää myös täydellistä massan lajittelua ja puhdistusta muiden epäpuhtauksien poistamiseksi /1/. Prosessin tavoitteena on siis mahdollisimman puhtaan uusiomassan tuottaminen.

Painoväripartikkelien poistotavasta riippuen puhutaan joko pesu- tai vaahdotussiistauksesta. Vaahdotus- eli flotaatiomenetelmä on kuitenkin hallitseva Euroopassa sekä Japanissa ja noin 75-80 % maailmassa tuotetusta uusiomassasta on valmistettu sitä käyttäen /2/. Flotaatiostiistauksen yleisyydestä johtuen on tässä tutkimuksessa keskitytty sen tarkasteluun. Pesustiistaukseen ei siis ole puututtu, eikä tässä työssä saatuja tuloksia voida siihen soveltaa, sillä nämä kaksi menetelmää vaativat partikkeleilta aivan päinvastaisia ominaisuuksia.

3. SIISTAUKSEN OSAPROSESSIT

Kuvassa 1 on esitetty osaprosessit tyypillisessä markkinamassaa valmistavassa siistauslaitoksessa, joka käyttää raaka-aineenaan pääasiassa sanoma- ja aikakauslehtipaperia. Siistauksen prosessikaavio vaihtelee kuitenkin tehtaittain käytetystä raaka-aineesta ja lopputuotteelle asetetuista vaatimuksista riippuen.



KUVA 1. Siistatun uusiomassan valmistusprosessin päävaiheet.

3.1 Pulpperointi

Pulpperointivaiheen tarkoitus on kuiduttaa paperi ja irroittaa painoväripartikkelit kuiduista samalla pitäen muut mahdolliset epäpuhtaudet riittävän suurina eli helposti poistettavina /3/. Epäpuhtauksien osuus voi olla jopa 5-10 % pulpperointiin tulevan jätteen painosta ja ne pyritään poistamaan jo siistausprosessin alussa /4/. Nykyisin yleisimmin käytetyt pulpperijärjestelmät ovat korkeasakeuksisia panospulppereita tai jatkuvatoimisia rumpupulppereita /5,6/.

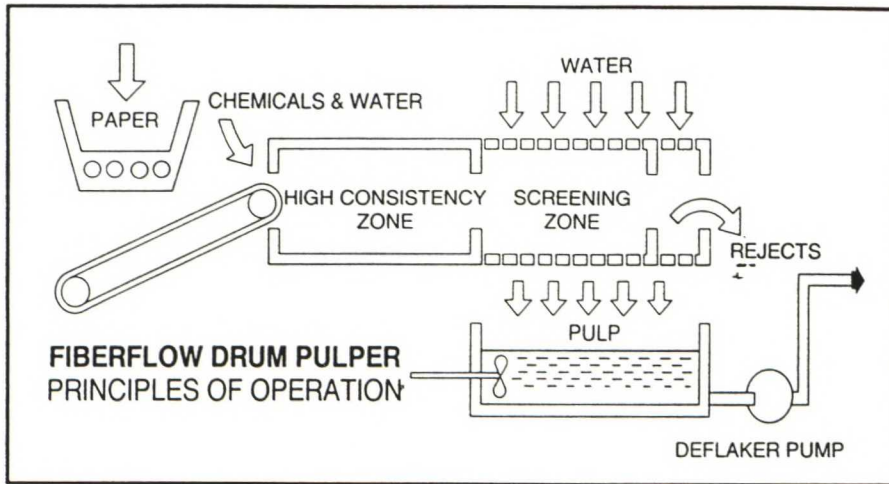
Kuvan 2 kaltaisissa korkeasakeuksisissa panospulppereissa jätteenpaperi hajoitetaan pulperin pohjalla olevalla ruuviroottorilla. Roottori pyörii suhteellisen hitaasti, jolloin massa ei pyöri roottorin mukana vaan nousee ylöspäin säiliön seinää pitkin ja valuu takaisin alas kohti keskustaa. Tämän johdosta uutta massa tulee jatkuvasti roottorin läheisyyteen, jossa hajoittavat voimat ovat suurimmillaan /6/. Panospulperin huonona ominaisuutena voidaan pitää sen taipumusta pilkkoa epäpuhtaudet liian pieniksi, jolloin ne ovat lajittelussa vaikeasti poistettavissa.



KUVA 2. Korkeasakeuksisen panospulpperin rakenne /6/.

Ahlströmin jatkuvatoimisen rumpupulpperin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. Rummun ensimmäisessä osassa jätepaperin sakeus säädetään vedellä ja kemikaaleilla 14-18 %:ksi. Kuituuntuminen tapahtuu massan pudotessa toistuvasti pyörivän rummun kehältä sen pohjalle /7/.

Kuidutusvaiheen jälkeen massa siirtyy lajitteluvyöhykkeeseen, jossa suihkuvesi laimentaa massan 3-4 % sakeuteen. Kuituuntunut akseptimassa poistuu laimennusveden mukana sihtilevyn läpi akseptisäiliöön ja kuituuntumattomat epäpuhtaudet erottuvat kokonaisina rummun päästä /7/. Panospulpperiin verrattuna kuidutusrummun toimintamekanismi on huomattavasti hellävaraisempi ja sen on todettu olevan tehokkaampi sekä epäpuhtauksien poistajana että mustepartikkelien irroittajana /8/.



KUVA 3. Rumpupulpperi (Ahlström) /9/.

3.2 Massan esipuhdistus

Esipuhdistuksen tarkoituksena on poistaa sulputuksen jälkeen jäljelle jääneet isoimmat epäpuhtaudet ennenkuin ne hajoavat vaikeammin erotettaviksi. Esipuhdistusvaiheessa niiden poistaminen on kalliimpaa kuin pulpperointivaiheessa, sillä erotuslaitteita tarvitaan enemmän ja täten pääoma- ja käyttökustannukset ovat suuremmat /10/. Erotettavien epäpuhtauksien määrä esipuhdistusvaiheessa on noin 1,5-2 % massavirrasta /11/.

Sulputettu keräyspaperimassa sisältää vaihtelevia määriä erilaisia epäpuhtauksia ja hajomattomia paperipaloja eli flakeja. Rumpupulpperilta massa voidaan pumpata eteenpäin DF-pumpulla (DeFlaker), jonka rakenteesta johtuen massa joutuu voimakkaaseen turbulenttiseen virtaukseen. Tämän johdosta kuidut hiertyvät tehokkaasti toisiaan vasten parantaen siistauksen tehokkuutta seuraavissa prosessin vaiheissa /9/.

Uusiomassan esipuhdistuksessa massaa tiheämpien epäpuhtauksien poistamiseen käytetään sakeamassapyörrepuhdistimia. Siistauslaitoksissa tyypillisiä rejektoituneita aineita ovat mm. metallikappaleet, kivet, nitit yms. /1/. Poistamalla nämä epäpuhtaudet parannetaan sekä massan puhtautta että estetään niiden aiheuttamat prosessilaitteiden, kuten pumppujen ja painelajittimien, rikkoutuminen.

Esipuhdistusvaihe käsittää myös painelajittimet, joiden toiminta perustuu niiden kykyyn poistaa epäpuhtauksia lähinnä muodon ja koon perusteella /9/. Käytettäessä Ahlströmin MODUSScreen-tyyppistä painelajitinta voidaan lajittimen erikoisrakenteiden avulla poistaa myös kevyitä muoviepäpuhtauksia. Kevyillä muoveilla on taipumus kertyä lajittimen yläosaan, josta ne voidaan poistaa joko jatkuvatoimisesti tai jaksottaisesti kevyen rejektin poistoputkien kautta. Tätä varten lajittimeen voidaan asentaa kartion muotoinen kansi, jonka avulla muovien kertyminen ja poistaminen saadaan mahdollisimman tehokkaaksi /12/.

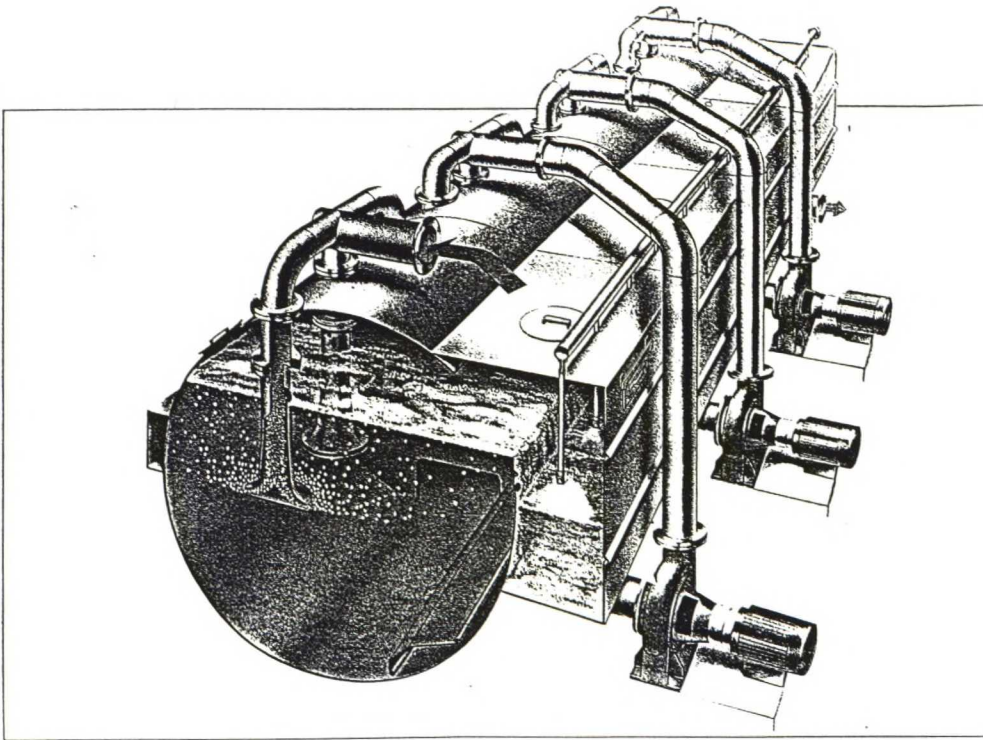
3.3 Vaahdotus

Vaahdotus eli flotaatio on erotusmenetelmä, jossa käytetään hyväksi erilaisten partikkelien erilaisia pintakemiallisia ominaisuuksia. Tässä kirjallisuustutkimuksessa selvitetään vain tavanomaisten flotaatiokennojen toimintaa sekä niiden vaatimia olosuhteita. Tavanomaisella flotaatiokennolla tarkoitetaan tässä yhteydessä kennoa, jossa kemikaalien avulla agglomeroidut hydrofobiset painoväripartikkelit tarttuvat kennoon puhallettuihin ilmakupliin ja nousevat kennon pintaan. Pinnalle muodostunut vaahto painoväreineen ja muine epäpuhtauksineen voidaan poistaa kaapimalla, ylijouksulla tai imun avulla. Suurin osa hydrofiilisista kuiduista jää sulppuun /13/. Osa kuiduista rejektoituu kuitenkin hydrodynaamisista tekijöistä johtuen. Vaahdotussiistauksen etuna pesumenetelmään verrattuna on alhaisen vedenkulutuksen lisäksi korkea kuitusaanto (90-95 %), joka saavutetaan selektiivisen musteenpoiston ansiosta.

Tavanomaisten flotaatiokennojen olosuhteissa tapahtuva vaahdotus vaatii epäpuhtauksien mahdollisimman tarkkaan poistamiseen 10-12 minuutin viiveen. Käytännössä tämä on järjestetty siten, että kennoja on kytketty sarjaan useampia kappaleita, jopa 10-12, flotaatiokennon tyyppistä riippuen. Kuituhäviöiden pienentämiseksi ensiövaiheen kennojen rejekti kootaan toisiokennoon ja vaahdotetaan vielä kertaalleen. Toisiovaiheen aksepti johdetaan takaisin ensiövaiheen syöttövirtaan ja rejekti ohjataan ulos prosessista lietteen käsittelyyn /14/.

Eri valmistajien kennot eroavat toisistaan lähinnä vaahdotusilman syötön, virtausjärjestelyjen ja vaahdonpoiston osalta.

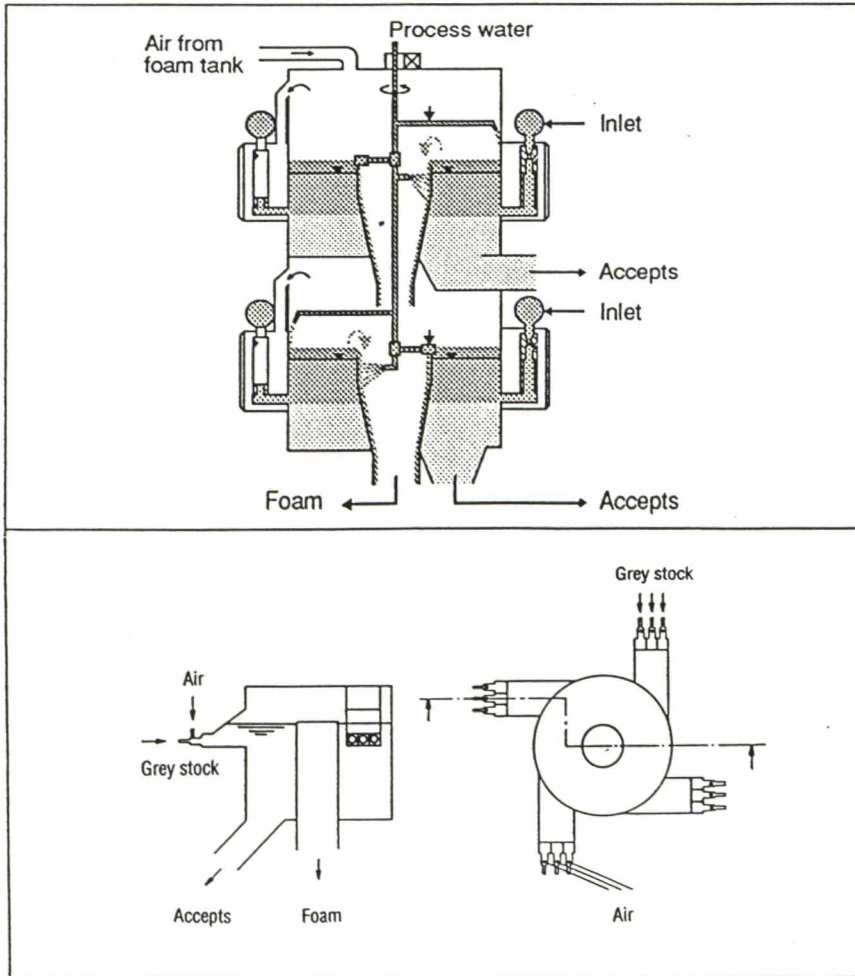
Kuvassa 4 on esitetty Voith'n vaahdotussysteemi, joka koostuu täysin suljetuista putkimaisista kennoista, joihin vaahdotusilma ja sulppu virtaavat samoja syöttöputkia pitkin. Näitä sulpunsyöttöyhteitä voi olla useitakin yhtä kennoa kohti. Ilmansyöttö tapahtuu itseimevästi, joten erillisiä puhaltimia tai kompressoreja ei tarvita. Tällä menetelmällä ilman ja sulpun sekoittuminen tapahtuu jo ennen kennoa, joten kennon sisällä ei ole pyöriviä sekoittimia. Aksepti otetaan kennon pohjalta ja johdetaan seuraavan vaiheen syöttöön rejektin poistuessa ylikkaatona kennon laidalta /15/.



KUVA 4. Voith-kennon halkileikkaus, jossa on nähtävissä vaahdotusilman ja massan yhteiset syöttösuuttimet sekä vaahdon poistuminen ylikkaatona /15/.

Myös Sulzer-Escher Wyss'n CF-kennossa (Compact Flotation), joka on esitetty kuvassa 5, sulpun ja vaahdotusilman sekoittuminen tapahtuu jo ennen kennoa erityisten itseimevien diffuusorien avulla. Ilmastettu massa syötetään tangentialisesti sylinterin muotoisen ken-

non yläosaan, josta ilmakuplilla ja niihin tarttuneilla epäpuhtauksilla on lyhyin matka kennon pintaan. Rejekti kootaan ylikaatona kennon keskeltä ja aksepti johdetaan sylinterin pohjalta seuraavaan vaiheeseen /16/.

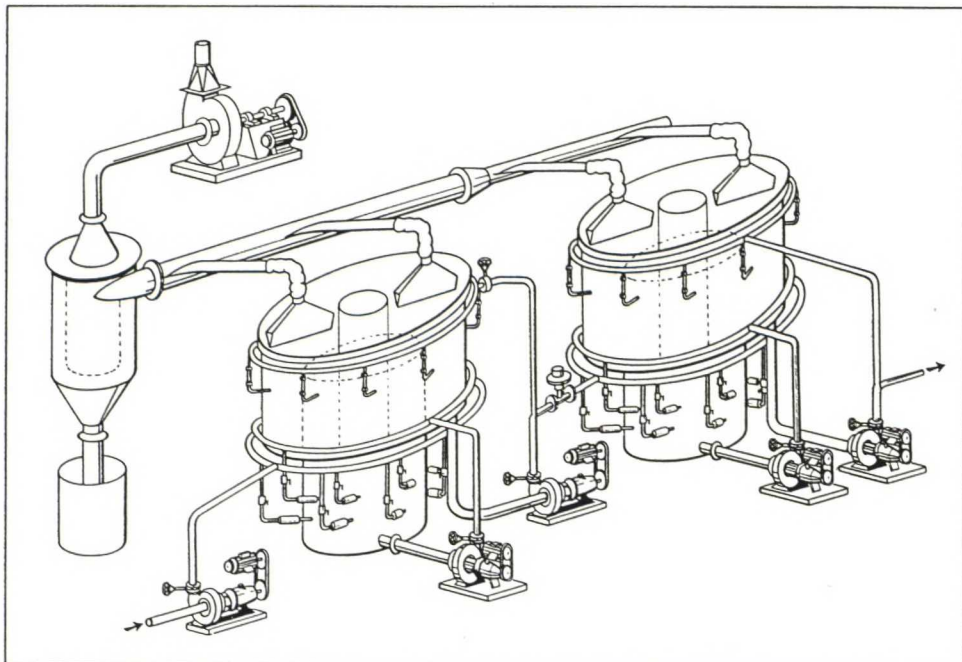


KUVA 5. Escher Wyss-kennon rakenne ja toimintaperiaate, jossa on nähtävissä sulpun ilmastusdiffuusorit sekä tangentialiset sulpunsyöttöyhteet /16/.

Feldmühle-Lamort Verticel DA (Double Aeration) tyyppinen kenno koostuu kolmesta sisäkkäisestä sylinteristä, joista sisimmän tarkoituksena on kontrolloidun virtauksen aikaansaaminen kennon sisälle (kuva 6). Vaahdotusilman ja sulpun seos johdetaan keskimmaiseen kammioon tangentialisesti suunnattujen injektoreiden kautta. Kennon pohjalta otetaan sisäänsyötettyä määrää vastaava osuus sulpusta uudelleen ilmastettavaksi ja johdetaan takaisin keskimmaiseen kammioon primääri-injektoreiden yläpuolelta /17/.

Sulppu nousee pyörteenä kennon yläosaan, jossa on ylikaato uloimpaan kammioon juuri ennen kennon pintaa. Aksepti otetaan uloimman kammion pohjalta ja johdetaan toiseen kennoon. Osa akseptivirtauksesta palautetaan uudelleen ilmastettuna ensimmäisen kennon uloimpaan kammioon /17/.

Ilmakupliin tarttuneet epäpuhtauspartikkelit kerääntyvät molemmista kammioista kennon pinnalle, johon muodostuva vaahto joutuu kennossa vallitsevista virtauksista johtuen pyörivään liikkeeseen. Vaahto poistetaan muiden valmistajien ratkaisuksista poiketen kiinteiden imulaitteiden avulla /17/.



KUVA 6. Lamort Verticel DA kennojen rakenne /17/.

3.4 Massan jälkipuhdistus

Keräyspaperin mukana tulee yleensä aina niin paljon erilaisia epäpuhtauksia, että laimean massan lajittelu jossain muodossa on välttämätöntä. Jälkilajittelu suoritetaan 0,5-1,0 % sakeudessa ja siihen käytetään tavallisesti sekä pyörrepuhdistimia että painelajittimia /1/. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään kuituja tiheämpien epäpuhtauksien poistoon tarkoitettu-

ja tavanomaisia pyörrepuhdistimia, toisessa pienireikäisiä painesihtejä sekä kolmannessa vaiheessa kevyiden epäpuhtauksien poistoon tarkoitettuja käänteisiä pyörrepuhdistimia /10/.

Jälkipuhdistuksen ensimmäisessä vaiheessa pyörrepuhdistimien tehtävänä on poistaa partikkelien ominaispainoon perustuen pienikokoisia mutta painavia epäpuhtauksia, kuten hienoa hiekkaa. Painelajittelulla poistetaan taas partikkelien koon, tiheyden ja muodon perusteella erilaisia kevyitä epäpuhtauksia, jotka suurimmalta osalta ovat erilaisia tahmoja, muoveja ja tekstiilejä /18/. Jälkipuhdistuksen kolmannessa vaiheessa poistetaan käänteisillä pyörrepuhdistimilla tiheydeltään kuituja pienempiä epäpuhtauksia, kuten muoveja, vahaa ja tahmoja /10/.

3.5 Saostus

Jälkipuhdistuksen jälkeen laimea kuitusulppu (0,4-0,6 %) saostetaan kiekkosuotimella 10-12 %:n sakeuteen, jolloin massasta erottuu myös osa veteen liuenneista ja hyvin pienikokoisista epäpuhtauksista /9/. Kiekkosuotimen jälkeen massa puristetaan kaksoisviirapuristimella noin 30 % sakeuteen, jolloin massan valmistuksen ja paperikoneen vesien sekoittuminen saadaan mahdollisimman vähäiseksi /19,20/.

3.6 Dispergointi

Huolimatta dispergointia edeltävistä prosessivaiheista ei kaikkia massan sisältämiä epäpuhtauksia saada poistettua. Sen vuoksi jäljelle jääneet epäpuhtaudet pyritään dispergoimaan eli hajoittamaan pieniksi hiukkasiksi massan joukkoon. Tämä saadaan pääasiassa aikaan mekaanisen hajoituksen avulla, jonka vaikutusta tehostetaan lämmittämällä massaa höyryllä /19/. Massan lämmitys tapahtuu ennen dispersaattoria olevassa höyrysekoittimessa, johon korkeasakeuksinen massa johdetaan suoraan kaksoisviirapuristimelta /9/.

Dispergoinnissa massaa käsitellään mekaanisesti itseään vasten hiertämällä 95-100 °C lämpötilassa. Muokkausvaiheen aikana kuidut hiertyvät toisiaan vasten, jolloin tapahtuu lievää jauhautumista ja kuitujen sitoutumiskyky paranee. Samalla kuitujen seassa yhä

olevat epäpuhtauspartikkelit pilkkoutuvat tai liukenevat vaikeammin havaittaviksi ja vähemmän haitallisiksi hiukkasiksi massan joukkoon /9/.

Vaikka dispergointia käytetään yleisesti mustepartikkelien poiston jälkeisenä operaationa, voidaan se suorittaa myös sitä ennen. Tällöin tavoitteena on käytetyn musteenpoistomenetelmän kannalta optimikokoisten partikkelien saaminen /21/.

Dispergoinnin hajoittaessa näkyvät mustepartikkelit aiheuttaa se samalla myös massan tummumista (dispergoinnin jälkeen massan vaaleus on huonontunut noin 2-3 %-yksikköä) /20/. Tämän korjaamiseksi vaaditaankin lopputuotteen vaaleuden parantamiseksi useimmiten erillinen valkaisuvaihe.

3.7 Valkaisu

Käsiteltäessä hiokepitoisia paperimassoja emäksisissä olosuhteissa (pH yli 10), kuten siistauksen yhteydessä yleensä tapahtuu, tummuu hiokekuidun sisältämä ligniini antaen massalle kellertävän sävyn /22/. Kellertyminen voidaan estää käyttämällä voimakasta hape-tinta, kuten vety- ja natriumperoksidia, joko pulperiin lisättynä tai sitten loppusaostuksen ja dispergoinnin jälkeisessä valkaisussa /23/.

Jälkivalkaisua varten massan lämpötila nostetaan 50-70 °C sekoittamalla siihen kuumaa höyryä. Samanaikaisesti massaan lisätään valkaisukemikaaliliuos, joka useimmissa uusio-massatehtaissa on joko vetyperoksidia, natriumhydrosulfiittia (-ditioniittia) tai nykyisin myös formamidiinisulfiinihappoa (FAS), prosessin siistauskemiasta ja uusiomassan laadusta riippuen /19,24/. Jotta vaaleuden nousu jäisi pysyväksi, stabiloidaan massa hapotta-malla se rikkihapolla tai rikkidioksidivedellä pH-alueelle 6-7 /1/. Samalla massan pH saadaan samalle alueelle kuin paperikoneella.

3.8 Jälkisiistaus

Jälkisiistaus on usein tarpeellinen, sillä aikaisemmista erotusvaiheista huolimatta uusiomassa sisältää vielä massaa huonontavia ja prosessia haittaavia epäpuhtauksia. Varsinkin dispergointivaihetta käytettäessä jälkisiistaus on välttämätön niissä prosesseissa, joissa lopputuotteelta vaaditaan riittävää vaaleutta.

Jälkivaahdotus on yleensä yksivaiheinen, joten sen rejekti johdetaan takaisin esilajittelun jälkeisen vaahdotusvaiheen syöttövirtaan /20/. Vaahdotuksen jälkeen massasta pyritään erottamaan loput siinä olevista epäpuhtauksista pyörrepuhdistimilla ja painelajittimilla /9/.

3.9 Massan kuivaus ja pakkaus

Jos valmistettu massa on tarkoitettu käytettäväksi laitoksen yhteydessä sijaitsevassa paperitehtaassa, varastointi suoritetaan erillisissä varastosäiliöissä 4-12 % sakeudessa riippuen varastointitilan suuruudesta. Markkinamassalaitoksilla on massan sisältämä liika vesi poistettava varastoinnin ja kuljetuksen helpottamiseksi. Uusiomassan kuivaus voidaan tehdä joko rainakuivaimella, kuten sellulla yleensä, tai yksittäisinä kuituina hiutalekuivaimella. Kuivattu massa paalataan ja paketoidaan varastointia sekä kuljetusta varten /18/.

4. SIISTAUKSESSA KÄYTETYT KEMIKAALIT

Kemikaaleilla on suuri merkitys tärkeimmissä siistauksen osaprosesseissa, kuten pulpperoinnissa, flotaatiossa ja massan jälkivalkaisussa (taulukko 1). Pääasiallisesti siistauksessa käytetään kemikaaleja:

- kuiduttamiseen
- painoväripigmenttien irroittamiseen kuiduista
- vaahdotuksen apuaineina
- massan valkaisuun ja
- loppuhapotukseen /1/.

TAULUKKO 1. Siistauskemikaalit ja niiden toiminta /19/.

KEMIKAALI	ANNOS kg/t	TOIMINTA SIISTAUKSESSA
Natriumhydroksidi	10-20	kuidun ja musteen välisten sidosten heikentäminen, kuidun "turvottaminen"
Natriumsilikaatti	15-40	pH:n puskurointi, peroksidin suoja-aine, estää painoväriin jälleensaostumisen
Kompleksinmuodostajat	1-3	peroksidin suoja-aine
Vetyperoksidi	10-30	massan valkaisu, edistää painoväriin irroittamista hajottamalla kemiallisia poikittaissidoksia
Synteettinen tai semisynteettinen pinta-aktiivinen aine (usein nonioninen)	0,5-2	pulpperointi: painoväriin irroitus, dispergointi vaahdotus: kokooja, vaahdon stabilointi
Natriumsaippua/ Rasvahappo	5-12	pulpperointi: painoväriin irroitus, dispergointi vaahdotus: Ca-saippua --> kokooja vaahdon stabilointi
Kalsiumkloridi	2-6	veden kovuuden lisäys
Talkki	2-7	tahmojen poisto
Rikkihappo	0-20	massan loppuhapetus

5. PULPPERIKEMIA

Siistausprosessi alkaa pulpperissa, jonka tärkein tehtävä on keräyspaperin kuiduttaminen ja sen sisältämien epäpuhtauksien poistaminen. Tämän lisäksi pulpperoinnissa tapahtuu painoväripartikkelien irroittaminen kuiduista sellaisessa muodossa, että ne voidaan myöhemmin vaahdotuksessa poistaa. Tämän aikaansaamiseksi on partikkeleita kuituihin sitova kemiallinen sidos heikennettävä, joka tapahtuu mekaanisen työn ja kemikaalien

yhteisvaikutuksella /25/. Kemikaaleina käytetään tavallisesti natriumhydroksidia ja -karbonaattia sekä rasvahapposeoksia johdannaisineen /18/.

5.1 Natriumhydroksidi ja -karbonaatti

Pulpperoinnin aikana on pH pidettävä korkeana ($\text{pH} > 9$), varsinkin jos siistauskemikaalina käytetty pinta-aktiivinen aine eli tensidi on rasvahappo, joka saippuoituu alkalivaikutuksesta. pH:n säätöön käytetään yleisesti natriumhydroksidia eli lipeää ja natriumsilikaattia eli vesilasia /6/.

Alkalisessa ympäristössä kuidut turpoavat. Tällä tarkoitetaan reaktiota, jossa alkalivaikutuksesta kuidussa olevat karboksyyli- ja muut heikosti happamat ryhmät dissosioituvat. Tällöin muodostuu kuitufibrillien välinen repulsio, jonka johdosta vesi pääsee tunkeutumaan niiden väliseen tilaan samalla kun molekyylien välinen vuorovaikutus heikkenee. Tämä hajoittaa fibrillien välisiä sidoksia aiheuttaen niiden rakenteen löystymistä, joka yhdessä mekaanisten voimien kanssa edistää keräyspaperin hajoamista ja painoväripartikkelien irtoamista kuiduista /14/.

Osa painovärin sisältämistä sideaineista pohjautuu luonnon rasvoihin ja kasviöljyihin /14/. Natriumhydroksidi pilkkoo saippuoimalla ja hydrolysoimalla näitä yleisesti käytettyjä sideaineita, mikä edestää painoväreissä käytettyjen pigmenttien irtoamista ympäröivään vesifaasiin /25/.

Kuitujen turpoaminen ja painovärin sideaineen hydrolysoituminen ovat riippuvaisia ympäröivän liuoksen pH:sta eli hydroksyyli-ionin konsentraatiosta. Nämä reaktiot kuluttavat liuoksessa olevia hydroksyyli-ioneja, joita joudutaan siis lisäämään. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi natriumkarbonaattia tai -silikaattia käyttäen. Karbonaatti-ionit tuottavat hydroksyyli-ioneja reaktion



mukaisesti, kun taas silikaatti reagoi veden kanssa seuraavasti:

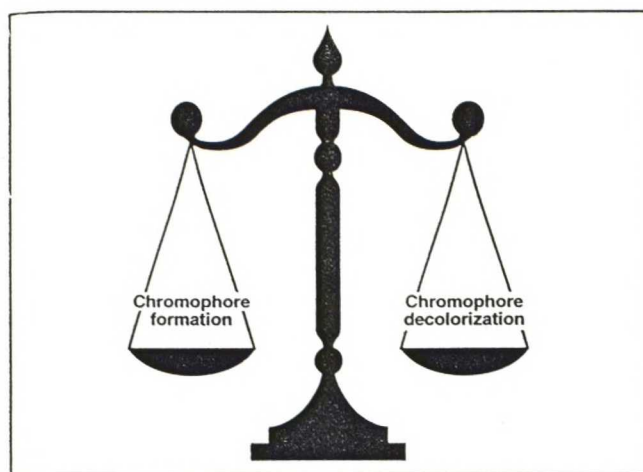


CO_3^{2-} on voimakkaampi emäs kuin silikaatti, joten samassa konsentraatiossa on karbonaattiliuoksen pH korkeampi kuin silikaattiliuoksen /14/. Korkeampi pH johtaa usein myös parempaan siistaustulokseen.

5.2 Vetyperoksidi

Peroksidia lisätään pulpperiin valkaisuamaan alkalien vaikutuksesta tummuneita puupitoisia massoja. Puupitoista keräyspaperia siistattaessa natriumhydroksidi aiheuttaa massan kellertymistä, johon ovat syynä korkeassa pH:ssa ligniiniin muodostuvat värilliset kromoforiryhmät /26/. Peroksidi stabiloi massan alkalista tummumista vastaan ja estää värillisten kromoforiryhmien muodostumisen.

Pulpperissa vallitsevat olosuhteet kuten massan sakeus, aika ja lämpötila ovat usein riittämättömät tehokkaaseen valkaisuun. Näin ollen on edullisempaa lisätä peroksidia vain sen verran, että massan vaaleus saadaan pidettyä alkuperäisellä tasolla (kuva 7) /6,26/.



KUVA 7. Pulpperiin lisättävän peroksidiannoksen tasapaino /26/.

Peroksidin reagoidessa natriumhydroksidin kanssa muodostuu perhydroksyyli-anioni (HOO^-), joka on varsinainen valkaiseva tekijä peroksidivalkaisussa /14/.



Peroksidivalkaisu pulpperissa vaatii onnistuakseen olosuhteet, joissa perhydroksyyli-anionin muodostuminen on tehokkaimmillaan. Tämän aikaansaamiseksi sakeuden ja reaktioajan tulee olla riittävät /3/. pH:n on jatkuvasti oltava välillä 9-11 sekä lämpötilan pulpperissa niin korkea kuin mahdollista. Liian korkea lämpötila saattaa kuitenkin pehmittää jät-paperissa epäpuhtautena esiintyvät termoplastiset tahmoaineet vaikeuttaen niiden poistoa lajittelussa /6/.

Offset-värien kuivuessa ja paperin vanhetessa syntyy kemiallisia poikittaissidoksia alkydisideainemolekyylien välille. Peroksidi pystyy hajoittamaan näitä sidoksia ja edesauttaa siten myös painoväriin irrotusta /6/.

5.3 Kompleksinmuodostajat

Raskasmetalli-ionit kuten mangaani, kupari ja rauta kykenevät hajoittamaan peroksidin seuraavan reaktion mukaan:

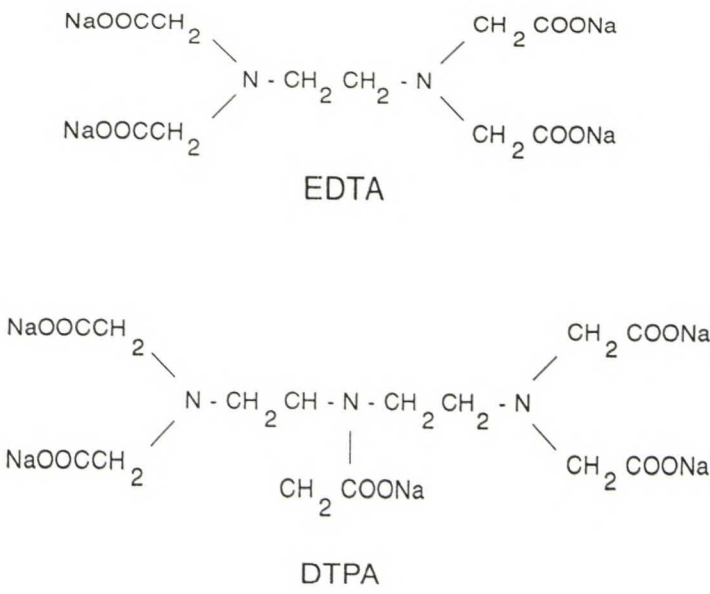


Metalli-ioneja kulkeutuu prosessiin kuituraaka-aineen, prosessikemikaalien ja tuoreveden mukana. Niitä voi liueta myös siistauksessa käytettävistä laitteista. Taulukkoa 2 tarkasteltaessa voidaan kuitenkin todeta keräyspaperimassan raskasmetalli-ionipitoisuuksiin vaikuttavan eniten paperiraaka-aineen sisältämät täyteaineet ja käytetyn musteen koostumus /27,28,29/.

TAULUKKO 2. Pohjois-Amerikkalaisista ja Eurooppalaisista keräyspaperimassoista määritettyjä rauta-, kupari- ja mangaani-ionipitoisuuksia /27,28,29,30/.

	Pohjois- Amerikka							Eurooppa
Metalli (ppm)	sanomalehti painamaton painettu		aikakauslehti painamaton painettu		70/30 seos	vesi	kemikaalit	50/50 seos
Fe	8	10	251	256	250	0,07	16	800-1200
Cu	3	5	6	56	20	0,05	10	30-60
Mn	59	68	15	28	50	0,004	0,05	60-100

Metalli-ionien vaikutuksesta tapahtuva peroksidin hajoaminen voidaan estää lisäämällä pulppiin kelatointiaineita. Yleisimmin käytettyjä ovat DTPA ja EDTA, jotka muodostavat massan sisältämien raskasmetalli-ionien kanssa liukoisia komplekseja, joilla ei ole peroksidin hajoamista katalysoivaa vaikutusta /27/. DTPA:n ja EDTA:n rakennekaavat on esitetty kuvassa 8 /29/.



NaOOCCH₂

2

CH₂COONa

NaOOCCH₂

2

CH₂COONa

N

-

CH₂

CH

-

N

-

CH₂

CH₂

-

N

CH₂COONa

CH₂COONa

DTPA

KUVA 8. DTPA:n ja EDTA:n rakennekaavat /29/.

5.4 Natriumsilikaatti

Natriumsilikaatti eli vesilasi on vesiliukoinen polymeeri, joka pystyy sitomaan moniarvoisia ioneja /6/. Natriumsilikaatti muodostaakin kompleksinmuostajien tavoin kelaatteja ja toimii siten peroksidin suoja-aineena estämällä metalli-ionien aiheuttaman peroksidin hajoamisen /27/.

Natriumsilikaatti on myös alkalilähde eli sen reaktiosta veden kanssa vapautuu hydroksyyli-ioneja. Silikaattia käytetäänkin sulpun pH:n säätöön ja puskuroimiseen vetyperoksidin toiminnan kannalta sopivalle tasolle /14/.

Vesilasi adsorboituu todennäköisesti sekä kuituihin että kolloidaalisten hiukkasten rajapintoihin sitoutumalla pinnoissa sijaitseviin karboksyyli-ryhmiin. Tämä silikaatin ominaisuus edestää painovärin dispergointia ja estää sitä saostumasta uudelleen kuituihin /6/.

5.5 Pinta-aktiiviset aineet

Aineita, jotka adsorboitumalla voimakkaasti pintoihin aiheuttavat merkittävää pintajännityksen laskua, kutsutaan pinta-aktiivisiksi aineiksi /31,s.68/. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi rasvahapposaippuat sekä synteettiset tensidit.

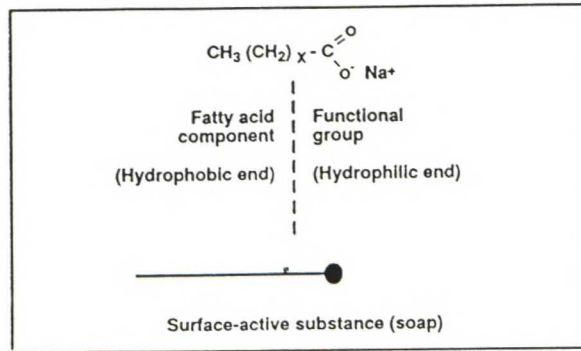
5.5.1 Saippua

Saippua on anioninen tensidi, jolle on tunnusomaista pitkään hiilivetyketjuun liitetty hydrofiilinen atomiryhmä. Tämä vesihakuinen ryhmä orientoituu veteen päin samalla kun hydrofobinen hiilivetyketju pyrkii hylkimään vettä /6/.

Natriumhydroksidin ja rasvahapon välisessä reaktiossa muodostuu vastaavaa rasvahapon natriumsaippuaa seuraavan reaktiokaavan mukaan. Natriumsaippuan rakennekaava on esitetty myös kuvassa 9.



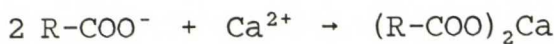
(5)



KUVA 9. Rasvahapposaippuan rakenne /35/.

Euroopassa käytetyistä siistauskemikaaleista on rasvahapon osuus noin 80-90 %, johtuen sen huokeasta hinnasta ja helppokäyttöisyydestä /36/. Rasvahappomolekyyli koostuu suoraketjuisesta hiilivedystä, johon on liittynyt karboksyyli-ryhmä. Hiilivetyketjussa voi esiintyä kaksoissidoksia, jolloin rasvahapon sanotaan olevan tyydyttämätön.

Rasvahapot ovat sellaisenaan veteen liukenemattomia, kun taas niiden natriumsuolat ovat erittäin vesiliukoisia. Veden kovuuden noustessa tämä vesiliukoisuus ja samalla saippuan pesuteho laskevat merkittävästi. Syynä tähän on saippuamolekyylin reagointi kovan veden kalsium-ionien kanssa, jolloin muodostuu veteen liukenematonta kalkkisaippuaa (kaava 6). Tätä reaktiota käytetään myöhemmin hyväksi flotaatiossa /6/.



(6)

Rasvahapon tai rasvahapposeoksen ominaisuudet määräytyvät ketjunpituuden sekä kaksoissidosten määrän mukaan. Näitä ominaisuuksia kuvataan yleisesti seuraavilla suureilla:

- jodiluku ja
- tiitteri /6/.

Jodiluku kuvaa suoraan rasvahappomolekyylissä olevien kaksoissidosten määrää, jota voidaan alentaa antamalla rasvahapon reagoida katalyyttien välityksellä vetykaasun kanssa. Tätä prosessia kutsutaan kovettamiseksi /6/. Pitkälle kovetettu tuote on heikosti vaahtoavaa ja antaa pienen rejektimäärän. Vaahto on tummaa, joka merkitsee selektiivisyyden painoväriin suhteen olevan hyvä. Mikäli rasvahappoa kovetetaan liikaa on olemassa vaara, että rejektin määrä jää liian pieneksi. Tämä vaikuttaa kielteisesti loppuvaaleuteen /6/. Liian vähäinen kovettaminen johtaa puolestaan runsaaseen vaahtoamiseen ja vaahdotuksen epäselektiivisyyteen. Samoin rejektin määrä on korkea /6/. Näin ollen tavanomaisissa vaahdotuskennoissa käytettyjen rasvahappojen optimaalinen jodiluku on noin 25 /36/.

Tiitteri puolestaan on rasvahapon jähmettymispiste eli se lämpötila, jossa rasvahappo kiteytyy. Tiitteri kasvaa kovettumisasteen ja ketjunpituuden mukaan /6/. Yleisimmät siistauksessa käytetyt rasvahapot koostuvat 16-18 hiiliatomin ketjusta, jolloin niiden ominaisuudet ovat siistauksessa vallitsevien olosuhteiden kannalta parhaimmat. Tyypillisiä esimerkkejä ovat öljy- ja steariinihappo, joissa molemmissa on 18 hiiliatomia /6/.

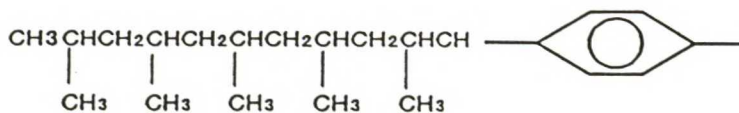
5.5.2 Synteettiset tensidit

Synteettisiä tensidejä alettiin käyttää, koska haluttiin saada käyttöön vaihtoehtoja, joilla ei olisi saippuan haittapuolia, kuten huonoa pesutehoa kovassa vedessä tai matalassa pH:ssa. Lisäksi synteettiset tensidit ovat rasvahapposaippuoita huomattavasti helpompia käsitellä, sillä niiden viskositeetti ei ole riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta /6/.

Perusrakenteeltaan synteettiset tensidit ovat saippuan kaltaisia eli ne koostuvat myös hydrofobisesta ja hydrofiilisesta osasta /6/. Hydrofobiset ryhmät ovat yleensä pitkiä orgaanisia ketjuja, jotka sisältävät pääasiassa hiili- ja vetyatomeja. Esimerkkeinä yleisesti siistauskemikaaleissa käytetyistä hydrofobeista voidaan mainita lineaariset alkyyli-ryhmät sekä haaroittuneet alkyyli-ryhmät (kuva 10) /34/.



linear alkyl group



branched alkyl group



aromatic group

KUVA 10. Siistauksessa käytettävien pinta-aktiivisten aineiden hydrofobisia ryhmiä /34/.

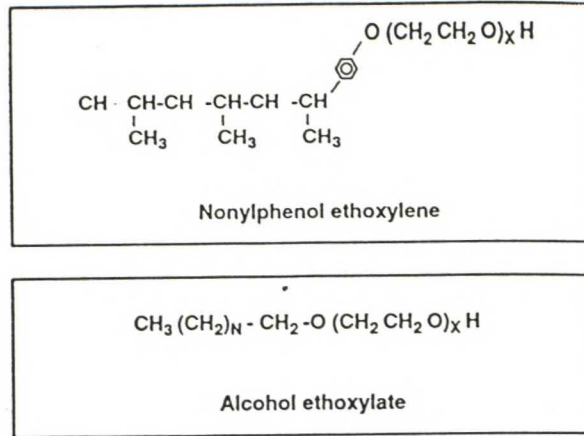
Tensidivaikutuksesta vastaavan molekyylin sähköisen luonteen perusteella puhutaan nonionisista, anionisista ja kationisista tensideistä /6/. On olemassa myös pinta-aktiivisia aineita, jotka koostuvat suureen hydrofiiliin kiinnittyneistä sekä positiivisesti että negatiivisesti varautuneista ryhmistä. Näitä kutsutaan amfoteerisiksi tensideiksi /34/.

Nonioniset pinta-aktiiviset aineet pysyvät vesiliuoksessa stabiileina, eikä niistä vapaudu ioneja ympäröivään liuokseen, kuten ionisista tensideistä. Niiden käytön etuna voidaan pitää myös sitä, että nonionisten tensidien tehokkuus on täysin riippumaton käytetyn prosessiveden kovuudesta /37,38/.

Useimmat nonioniset tensidit ovat hydrofiilisen etyleenioksidin ja hydrofobisen molekyyliosian reaktiotuotteita, joista tärkeimpiä ovat nonyylifenolietoksylaatit, etyleenioksidipropyleenioksidikopolymeeri ja etoksyloidut rasva-alkoholit (kuva 11) /3,6,39/. Viime vuosina on kuitenkin fenolietoksylaattien käyttö vähentynyt huomattavasti, koska niiden biologisesta hajoamisesta syntyy ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Kuvassa 12 esitetyn kaltaisten biologisesti edullisesti hajoavien rasva-alkoholietoksylaattien käyttö sen sijaan on voimakkaasti kasvamassa /6/.

Rasva-alkoholietoksylaatin vaahdonmuodostuskykyyn, liukenemis-, kostutus- ja dispergointiominaisuuksiin voidaan vaikuttaa vaihtelemalla etyleenioksidiyksiköiden määrää sekä rasva-alkoholiosan koostumusta /6/. Käyttökohteisiin, joissa vaatimuksena on erityisen

matala vaahto, on kehitetty rasva-alkoholialkoksylaatteja, joissa osa etyleenioksidista on korvattu propyleenioksidilla /6/.



KUVA 11. Nonionisten tensidien rakenteita /35/.

Ioniset tensidit voidaan siis jakaa kolmeen eri luokkaan: anionisiin, kationisiin sekä amfoteerisiin tensideihin. Anionisissa tensideissä on yksi tai useampia ryhmiä, jotka hajoavat vesiliuoksessa vapauttaen positiivisesti varautuneita ioneja. Tällöin negatiivisen varauksen saanut tensidin anioninen osa ja orgaaninen ketju vastaavat yhdisteen pintaaktiivisista ominaisuuksista /37/. Esimerkkeinä synteettisistä anionisista tensideistä voidaan mainita sulfonaatit, sulfaatit ja fosfaatit (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Anionisia tensidejä /38/.

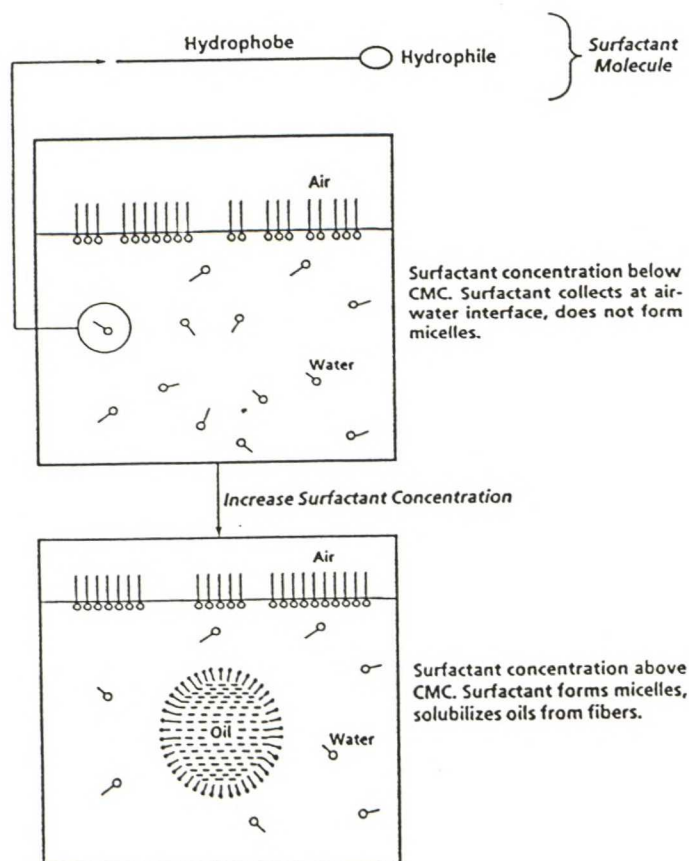
alkyylibentsyyilisulfonaatti	$\text{R}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$
rasva-alkoholisulfaatti	$\text{R}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$
rasva-alkoholi-eetterisulfaatti	$\text{R}-\text{O}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_x-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$

Kationiset tensidit vapauttavat vesiliuokseen anioneja ja yhdisteen pinta-aktiiviset ominaisuudet johtuvat tensidin kationisesta osasta yhdessä orgaanisen ketjun kanssa /37/. Kationisia tensidejä, kuten dialkyyldimetyyliammoniumkloridi, ei kuitenkaan käytetä yleisesti siistauksessa, koska ne adsorboituvat helposti varaukseltaan negatiivisiin kuituihin ja lisäävät siten rejektoituneen kuidun määrää /6,40/.

Amfoteerisiä pinta-aktiivisia aineita ovat esimerkiksi aminohapot. Näillä kemikaaleilla on sekä emäksinen että hapan ryhmä, jolloin yhdiste on kationinen happamassa ja anioninen alkalisessa liuoksessa /37/.

5.5.3 Kriittinen misellin muodostuskonsentraatio (cmc)

Lisättäessä pinta-aktiivista ainetta liuokseen, se asettuu neste-ilma rajapinnoille alentaen nesteen pintajännitystä (kuva 12). Konsentraatiota lisättäessä pintajännitys laskee, kunnes se tietyssä pinta-aktiivisen aineen konsentraatiossa saavuttaa stabiilin arvon. Tätä konsentraatiota kutsutaan kriittiseksi misellin muodostuskonsentraatioksi, sillä tässä pisteessä pinta-aktiivisen aineen molekyylit alkavat muodostaa misellejä sen sijaan, että pakkautuisivat yhä tiivimmin nestekalvon pintaan /31,s.154/. Misellillä tarkoitetaan pinta-aktiivisen aineen muodostamaa rakennetta, jossa tensidimolekyylin hydrofobiset ketjut ovat kääntyneet kohti misellin keskustaa poispäin vesifaasista hydrofiilisten pääteryhmien muodostaessa misellin pintakerroksen /31,s.155/.



KUVA 12. Pinta-aktiivisten aineiden käyttäytyminen alle ja yli cmc:n olevissa konsentraatioissa /32/.

Kunkin pinta-aktiivisen aineen cmc on erilainen, johtuen niiden erilaisista kemiallisista rakenteista. Hydrofobisen osan hiiliketjun pidentäminen, etyleenioksidiketjun lyheneminen ja hydrofobisen ketjun haaroittuneisuuden väheneminen johtavat kaikki cmc:n kasvuun ja lisäävät siten pulpperoinnissa tarvittavan pinta-aktiivisen aineen määrää /33/.

Tarkasteltaessa taulukkoa 4 todetaan, että nonionisten pinta-aktiivisten aineiden cmc on usein huomattavasti alhaisempi kuin kationisten tai anionisten.

TAULUKKO 4. Pinta-aktiivisten aineiden kriittisiä misellin muodostus konsentraatioita /34/.

PINTA-AKTIIVINEN AINE	TYYPPI	LÄMPÖTILA °C	CMC mol/dm ⁻³
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_4OH$	nonioninen	25	$4 \cdot 10^{-5}$
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_{14}OH$	nonioninen	25	$5,5 \cdot 10^{-5}$
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_{31}OH$	nonioninen	25	$8 \cdot 10^{-5}$
$C_{12}H_{25}SO_4 \cdot Na^+$	anioninen	25	$8,2 \cdot 10^{-3}$
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_4SO_4 \cdot Na^+$	anioninen	50	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$C_{12}H_{25}(C_6H_4)SO_3 \cdot Na^+$	anioninen	60	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$C_{12}H_{25}N^+(CH_3)_3Br^-$	kationinen	25	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$C_{12}H_{25}CH(COO^-)N^+(CH_3)_3$	amfoteerinen	27	$1,3 \cdot 10^{-3}$

5.5.4 Sameuspiste

Sameuspiste on pinta-aktiivisen aineen lämpötilariippuvuutta kuvaava termi /3/. Nostettaessa lämpötilaa pinta-aktiivisen aineen vesiliuos jakautuu kahteen faasiin, joista toisessa pinta-aktiivisen aineen konsentraatio on hyvin pieni, kun se toisessa on jopa yli cmc:n. Lämpötilan noustessa yli tietyn pisteen misellien välinen vuorovaikutus eli attraktio johtaa liuoksen sameutumiseen. Tätä pistettä kutsutaan sameuspisteeksi /3/.

Sameuspiste on tietyille nonionisille pinta-aktiivisille aineille tyypillinen ominaisuus, jolla on suora vaikutus tensidin toimintaan siistausprosessissa /32/. On todettu, että pinta-aktiivinen aine on tehokkaimmillaan lämpötiloissa, jotka ovat juuri alle sameuspisteen /3/. Näin ollen valittaessa tensidiä tiettyyn prosessiin, tulisi valinnassa ottaa huomioon myös käytetty prosessilämpötila.

5.5.5 HLB-arvo (Hydrophilic-Lipophilic Balance)

HLB-arvo kuvaa pinta-aktiivisen aineen vuorovaikutusta vesiliukoisten ja vettähylkivien aineiden kanssa. Alhaisen HLB-arvon omaavan pinta-aktiivisen aineen hydrofobiset ominaisuudet ovat vallitsevia, kun taas korkea HLB-arvo tarkoittaa molekyylin hydrofiilisten ominaisuuksien olevan hydrofobisia voimakkaampia /6/.

HLB-arvo lasketaan tensidin sisältämien hydrofiilisten ja hydrofobisten ryhmien välisten molekyyliainemassojen prosentuaalisena suhteena /3/. Pinta-aktiivisen aineen vesiliukoisuutta ja sopivuutta eri käyttökohteisiin voidaan arvioida vertaamalla sen HLB-arvoa empiiriseen asteikkoon, jossa öljyhapolle on annettu arvo 1,0 ja Na-oleaatille arvo 18,0 (taulukko 5) /6/.

TAULUKKO 5. HLB-arvon vaikutus tensidin toimivuuteen ja vesiliukoisuuteen /3,6/.

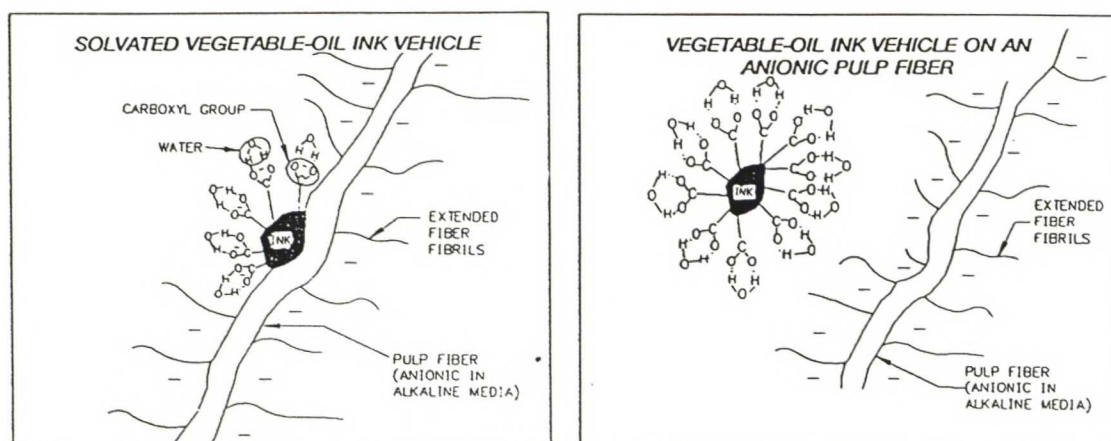
HLB-ARVO numeerinen	SOVELTUVUUS
1-4	vaahdonesto
4-6	W/O-emulgaattori
7-9	kostutusaine
8-18	O/W-emulgaattori
13-15	O/W-emulgaattori, puhdistusaine, liuotin
15-18	O/W-emulgaattori, liuotin

5.5.6 Pinta-aktiivisten aineiden toiminta pulperoinnissa

Pulperiin lisättyinä pinta-aktiiviset aineet edistävät pintojen kostumista vaikuttamalla pintajännityksiin. Pinta-aktiiviset aineet tarttuvat hydrofobisella osallaan hydrofobisiin epäpuhtauspartikkeleihin muuttaen partikkelien pintakemiallisia ominaisuuksia siten, että ne irtoavat helposti kuidun pinnasta /23/. Kuitujen kostuminen puolestaan helpottaa pulperointiliuoksen tunkeutumista jätepaperin kuiturakenteeseen edistään siten kuitujen turpoamista.

Kirjallisuudessa esiintyy useita artikkeleita, joiden mukaan pinta-aktiivisten aineiden kyky poistaa mustepartikkeleita selluloosakuiduista perustuu niiden taipumukseen muodostaa misellejä vesiliuoksessa /25,34/. Tämä hypoteesi on kuitenkin kyseenalainen, sillä misellien kapasiteetti liuottaa poolittomia öljyjä on erittäin pieni ja tämän lisäksi painoväreistä suurin osa on kuitenkin kiinteitä ja liukenemattomia partikkeleita (noki). Näin ollen pinta-aktiivisten aineiden pääasiallinen toimintamekanismi siistausprosessissa perustunee lähinnä painoväripartikkelien dispergointiin eikä misellien muodostumiseen (kuva 13) /41/.

Ero misellien muodostumisen ja dispergoinnin välillä on merkittävä, sillä dispergoitumista tapahtuu jo huomattavasti alle cmc:n olevissa konsentraatioissa. Dispergoinnissa pinta-aktiiviset aineet estävät irronneiden mustepartikkelien kiinnittymisen takaisin kuituihin adsorboitumalla partikkelien pintoihin siten, että ne muodostavat monomolekyläarisen kerroksen /41/. Tämä tapahtuu useimmiten jo konsentraatioissa, jotka ovat vain noin $0,1 \cdot \text{cmc}$. Tämän perusteella voidaankin tehdä suuntaa antavia arvioita erityyppisten pinta-aktiivisten aineiden tehokkuuksista dispergointiaineena niiden cmc-arvoja vertailemalla /41/.



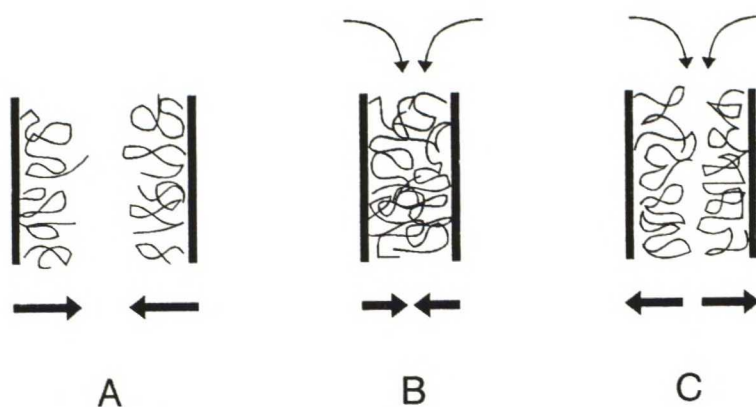
KUVA 13. Painovärin dispergoituminen /25/.

Pulpperoinnin alkalisissa olosuhteissa mustepartikkelit saavat korkean negatiivisen zeta-potentiaalin ilman rasvahapposaippuan lisäystäkin (noin -60 mV pH:ssa 10) /42/. Tämä johtuu luultavasti musteen sisältämistä orgaanisista hapoista, jotka rikastuvat pintakerrokseen ja ionisoituvat pH:n noustessa. Saippuan adsorboituminen mustepartikkelin pintaan lisää partikkelin negatiivista zeta-potentiaalia entisestään (yli -100 mV 100 mg/dm^3 natriumstearaatti lisäyksellä) /43/. Mustepartikkelien korkea negatiivinen varaus johtaa elektrostaattiseen repulsioon partikkelien ja negatiivisesti varautuneiden kuitujen välillä, joka edesauttaa mustepartikkelien irtoamista kuiduista ja niiden pysymistä dispergoituina /42/.

Synteettisten tensidien toimintamekanismi pulpperikemiassa riippuu lähinnä niiden kemiallisesta luonteesta /14/. Tensidien pääasiallinen vaikutus perustuu kuitenkin niiden pintakemiallisiin ominaisuuksiin, jolloin adsorpoitumalla kuitujen ja mustepartikkelien pintoihin ne alentavat pintajännityksiä ja edistävät musteen irtoamista kuiduista. Voimakkaasti öljyä veteen liuottavia tensidejä voidaan käyttää pulpperoinnissa myös painovärin öljypohjaisen sideaineen liuottamiseen, jolloin painovärin sisältämät väripigmentit irtoavat kuidun pinnasta /14/.

Anionisisten synteettisten tensidien dispergoiva vaikutus perustuu saman elektrostaattisen repulsion voimistamiseen kuin rasvahapposaippuoillakin. Mustepartikkelien kiinnittyminen uudelleen kuituihin saadaan estettyä myös esimerkiksi lisäämällä pulppiin nonionista tensidiä, joka adsorboitumalla partikkelien ja mahdollisesti myös kuitujen pintoihin johtaa steerisesti stabiloituun dispersioon /44/. Steeristä repulsiota ei esiinny ainoastaan kuitujen ja mustepartikkelien välillä, vaan se estää myös partikkelien agglomeroitumisen.

Partikkelit ovat steerisesti stabiloituja, kun niiden pinnat ovat kokonaan adsorboituneen aineen peitossa (kuva 14). Tällaisten partikkelien lähestyessä toisiaan pintoihin adsorboituneen aineen konsentraatio kasvaa niiden välisessä tilassa (A). Syntyvä konsentraatioero ympäröivään liuokseen nähden johtaa osmoottiseen virtaukseen, joka pyrkii tasoittamaan tätä paikallista konsentraation kasvua (B). Ympäröivä liuos tunkeutuu partikkelien väliseen tilaan ja pakottaa partikkelit erilleen (C) /31,s.48/.



KUVA 14. Malli kahden partikkelin välisestä steerisestä repulsiosta /31,s.48/.

Dispergointia voidaan myös tehostaa vesiliukoisilla polymeereillä, joita ei varsinaisesti lueta pinta-aktiivisiksi aineiksi. Tavallisimmin käytettyjä ovat karboksimeetyyliselluloosa (CMC) ja hydroksipropyylimetyyliselluloosa (HPMC) /14/. CMC:n dispergoiva efekti perustuu kuidun ja painoväripartikkelin välisen steerisen repulsion voimistamiseen /42/. Käytännössä vesiliukoisten polymeerien vaikutus siistauksessa on kuitenkin ainoastaan nimellinen, eikä niiden käyttö teollisuudessa ole kovinkaan yleistä.

6. VAAHDOTUSKEMIA

Pulpperoinnin jälkeen sulpuissa on dispergoituneena kuituja, painoväripartikkeleita, latekseista ja liimoista peräisin olevia tahmoja, täyteaineita ja erilaisia paperin päällystyspigmenttejä eli tuhkaa. Painoväripartikkelit ja tahmot pyritään poistamaan mahdollisimman täydellisesti, kun taas tuhkan erotustarve riippuu uusiomassan käyttötavasta /1/. Tis-suemassan valmistuksessa tuhka pyritään poistamaan mahdollisimman tarkkaan, mutta esimerkiksi painopapereissa uusiomassan mukana tuleva täyteaine on yleensä kelvollista raaka-ainetta.

Vaahdotus on selektiivinen erotusprosessi, jossa käytetään hyväksi partikkelien pintakemiallisia ominaisuuksia. Siistaajan kannalta on onnekasta, että käyttökelpoinen kuituaines on pintakemialliselta luonteeltaan hydrofiilistä ja yleisimmin käytetyt painovärit hydrofobisia /6/. Tämä helpottaa luonnollisesti painoväripartikkelien selektiivistä erottamista.

6.1 Kokoojat

Massan virratessa pulpperin jälkeisissä sekoitussäiliöissä, lajittimissa ja venttiileissä mustepartikkelien irtoaminen kuiduista jatkuu pulpperointiin lisättyjen kemikaalien ja mekaanisten voimien vaikutuksesta ja samalla ne hajoavat yhä pienemmiksi partikkeleiksi /25/. Vaahdotuksen mekanismi suosii hydrofobeja hiukkasia ja vaatii onnistuakseen, että hiukkaset kootaan vaahdotuskemikaaleilla isommiksi agglomeraateiksi ja että ne saavat öljymäisen pinnan /6/. Tällöin partikkelit tarttuvat voimakkein sidoksin ilmakupliin ja nousevat kennon pinnalle, hydrofiilisten kuitujen jäädessä sulppuun /45/.

Kokoojakemikaali voidaan lisätä joko pulpperiin tai juuri ennen vaahdotusta /46/. Annostusta on myös mahdollista jakaa, jolloin osa syötetään pulpperiin ja osa vaahdotukseen /6/. Kokoojakemikaalilta vaaditaan, että se kiinnittyy voimakkaasti poistettaviin hiukkasiin. Tämän seurauksena hiukkaset agglomeroituvat ja tarttuvat ilmakupliin /46/.

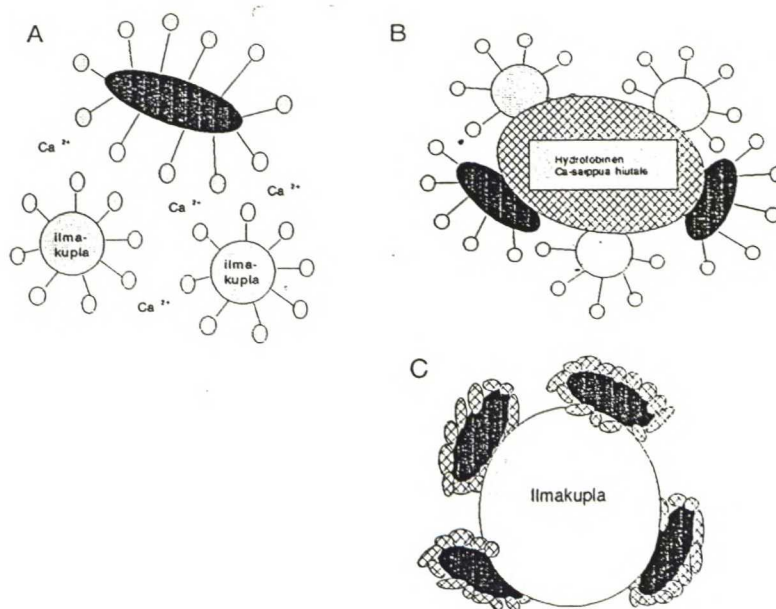
Vaahdotuksessa käytetty kokooja voi olla jokin tietty yksittäinen kemikaali tai erilaisten kemikaalityyppien yhdistelmä /21/. Kokoojakemikaalityypit voidaan jakaa kolmeen perusluokkaan:

- 1) rasvahappopohjaiset saippuat
- 2) synteettiset kokoojat ja
- 3) semisynteettiset kokoojat /21/.

6.1.1 Rasvahappopohjaiset kokoojat

Vaahdotusta varten rasvahapon natriumsaippua on muutettava veteen liukenemattomaksi kalkkisaippuaksi, joka saadaan aikaan lisäämällä sulpuun kalsiumia joko kalsiumkloridina tai -hydroksidina /47/. Reaktio on esitetty edellä reaktioyhtälössä (6). Rasvahappopohjainen kokooja voidaan lisätä prosessiin myös juuri ennen vaahdotusta, sillä se reagoi välittömästi kalkin kanssa ja toimii kokoojana samantien /36/.

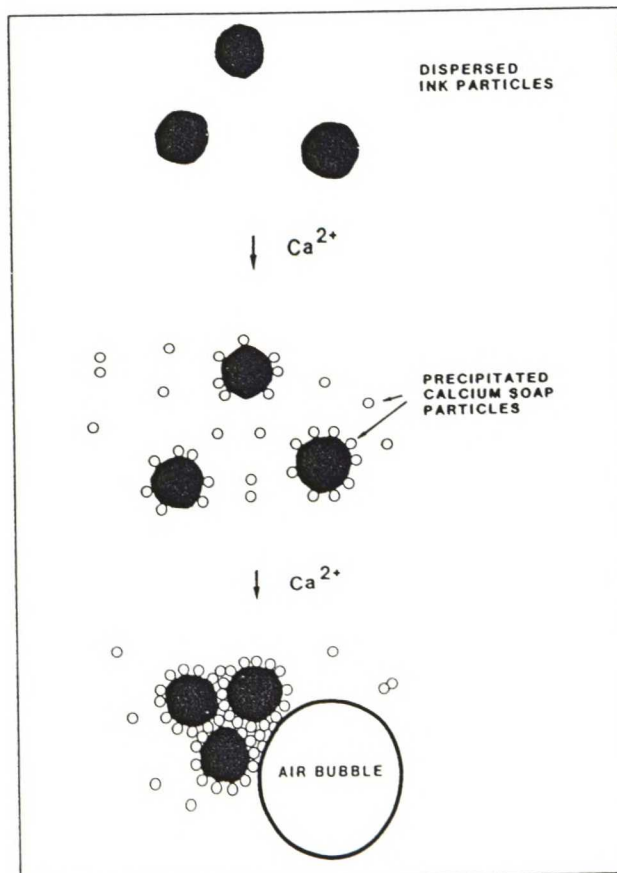
Kalsiumsaippuan toimintamekanismista on kirjallisuudessa esitetty useampaakin teoriaa. Putz et al. mukaan nämä teoriat voidaan jakaa kolmeen ryhmään, joiden periaatteet on esitetty kuvassa 15 /37/.



KUVA 15. Kolme teoriaa Ca-saippuan toiminnasta flotaatiossa /37/.

Mallissa A kalsiumsaippua saostuu sekä ilmakuplien että epäpuhtauspartikkelien pinnoille, jonka jälkeen kaksiarvoiset kalsiumkationit yhdistävät sillanmuodostusmekanismilla partikkelit ilmakupliin /25,48/. Mallin B mukaan kalsiumsaippuat muodostavat sulpuissa ensin saostumia, joihin hydrofobiset epäpuhtauspartikkelit ja ilmakuplat adsorboituvat /49/. Näiden teorioiden tueksi ei kuitenkaan ole esitetty kokeellisia tuloksia, vaan ne perustuvat pitkälti loogiseen päättelyyn.

Larsson et al. kokeiden ja mittausten mukaan dispergoituilla mustepartikkeleilla on korkea negatiivinen varaus. Tämä on vaahdotuksen kannalta epäedullista, johtuen partikkelien ja vastaavasti pinta-aktiivisten aineiden adsorboitumisen myötä negatiivisesti varautuneiden ilmakuplien välisistä repulsiovoimista /44/. Mallin C mukaan, kalsiumin lisäyksen jälkeen mustepartikkelit peittyvät saostuneen kalsiumsaippuakerroksen alle, jolloin niiden pintakeemialliset ominaisuudet muuttuvat kalsiumsaippuan vastaaviksi. Näin voimakkaasti hydrofobisiksi muuttuneet mustepartikkelit tarttuvat helposti ilmakupliin (kuva 16) /44/.



KUVA 16. Mallin C mukainen kalsiumsaippuan vaikutusmekanismi /42/.

Kalsiumsaippuan adsorboituminen alentaa mustepartikkelien zeta-potentiaalin tasolle -40 mV, joka johtaa myös niiden keskinäisen repulsion heikkenemiseen /42/. Tämän seurauksena mustepartikkelit muodostavat helposti aggregaatteja, joiden tehollinen törmäyshalkaisija on huomattavasti suurempi kuin yksittäisillä partikkeleilla. Tästä johtuen todennäköisyys ilmakuplaan törmäämisestä on aggregaatilla suurempi kuin yksittäisellä partikkelilla, joten aggregaattien muodostuminen tehostaa myös musteen poistumista /42/.

6.1.2 Synteettiset kokoojat

Viime vuosina on kehitetty myös synteettisiä kokoojakemikaaleja, jotka ovat anionisia tai nonionisia pinta-aktiivisia aineita /14/. Vaahdotuksessa kokoojakemikaalin tulee muodostaa kestävä sidos mustepartikkelin ja ilmakuplan välille. Anioniset tensidit sitoutuvat mustepartikkeleihin nonionisia huomattavasti voimakkaammin ja toimivat näinollen myös paremmin kokoojakemikaaleina /50,51/. Rasvahappopohjainen saippua on myös anioninen pinta-aktiivinen aine.

Ns. displectorit ovat kuitenkin nonionisia tensidejä, joissa on yhdistetty dispergointi- ja kokoojakemikaalin ominaisuudet yhteen molekyylisiin. Tensidin ketjujen pituuksia säätämällä on saatu aikaan yhdiste, joka kykenee toimimaan tietyissä olosuhteissa dispergointiaineena ja toisissa olosuhteissa kokoojana /52,53/. Nimitys displectori tuleekin englanninkielisistä sanoista dispersant ja collector.

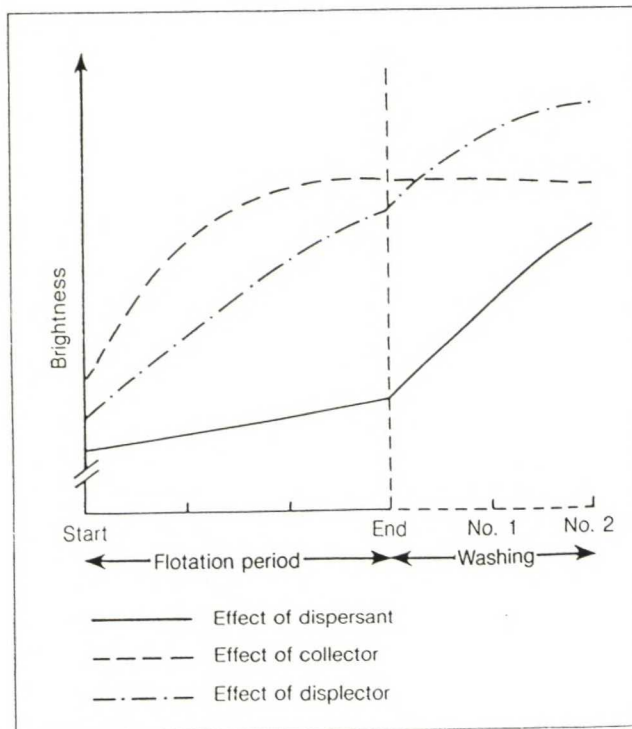
Alunperin displectorit kehitettiin yhdistettyyn pesu/vaahdotussiistaukseen, jossa niiden toiminta onkin tehokkaimmillaan /52/. Displectoreita voidaan toki soveltaa myös tavanomaiseen vaahdotussiistaukseen, jolloin kemikaali voi toimia dispergointiaineena pulpperoinnissa ja kokoojana vaahdotuskennossa /54/.

Erilaisten displectorien toimintamekanismi vaihtelee, mutta useimmiten niiden toiminta perustuu alhaisen HLB-arvon omaaviin tensideihin, jotka pulpperoinnissa antavat mustepartikkeleille öljymäisen pinnan /54/. Tämä ilmiö korostuu, jos molekyylillä sisältää alkaliherkkiä sidoksia, jotka hydrolysoituvat prosessin aikana. Korkeassa pH:ssa tapahtuvan

hydrolysoitumisen tuloksena molekyyliin muodostuu hydrofiilinen ja hydrofobinen osa, joka toimii sen jälkeen kokoojana vaahdotusvaiheessa /6/.

Displectorit ovat rasvahapposaippuista kalliimpia, mutta niiden sanotaan toimivan huomattavasti pienemmillä annoksilla ja lyhentävän vaahdotukseen vaadittavaa aikaa jopa 40 % /45/. Nonionisina tensideinä ne toimivat riippumatta ympäröivän prosessiveden kovuudesta, joten erillistä kalsium-ionien lisääystä ei siis tarvita /48/. Displectorien käyttö eliminoi myös saippuan mukanaan tuomat saostumis- ja kulkeutumisoongelmat, jotka voivat aiheuttaa suuria vaikeuksia paperikoneella /52,55/.

Displectorien tehokkuus rajoittuu kuitenkin vain puuvapaisiin keräyspaperilaatuihin. Puupitoista paperia, kuten sanomalehtipaperi, siistattaessa kuituhäviöt lisääntyvät, eivätkä saavutetut vaaleuden nousut ole parhaita mahdollisia /52,55/. Samoin displectorien ollessa luonteeltaan vain kompromissi kahden eri toimintamekanismin välillä, eivät niillä vaahdotuksessa saavutetut tulokset useinkaan vastaa esimerkiksi anionisilla tensideillä saatuja tuloksia /50/. Kuvan 17 mukaisesti displectorit toimivat kuitenkin erinomaisesti yhdistetyssä pesu/vaahdotus-siistauksessa.



KUVA 17. Eri kemikaaleilla saavutettu vaaleuden nousu vaahdotuksessa ja pesussa /50/.

6.1.3 Semisynteettiset kokoojat

Semisynteettiset kokoojat ovat vesiohenteisia emulsioita, joissa on vesifaasiin dispergoituna erilaisia aktiivikomponentteja asiakkaan toivomusten ja käyttötarkoituksen mukaan. Nämä kemikaalit lisätään normaalisti jo pulpperointiin, koska niiden vaikutusalue ulottuu yli koko siistausprosessin ja ne vaativat toimiakseen tietyn viiveen /36,56/.

Emulsiot sisältävät yleisesti rasvahappoja, rasvahappojohdannaisia ja erilaisia synteettisiä pinta-aktiivisia aineita, jotka vaikuttavat siistausprosessissa kukin omalla tavallaan /21,55/. On olemassa viitteitä, että emulsioon sisältyvän rasvahapon toimintamekanismi olisi samanlainen kuin saippualla, jolloin se saippuoituisi välittömästi joutuessaan kosketuksiin emäksisen pulpperiveden kanssa /57/. Näin ei kuitenkaan välttämättä ole, sillä rasvahapposaippuaan verrattuna semisynteettisellä kokoojalla on seuraavia etuja:

- Siistauksessa tarvittava emulsioannos on noin puolet saippuan vastaavasta, joten paperikoneelle kulkeutuvien kemikaalien määrä on pienempi /58/.
- Emulsio toimii hyvin pehmeässä vedessä, joten ylimääräistä kalsiumin lisäystä ei tarvita. Veden kovuuden laskiessa alenevat myös vaahdotuskennossa tapahtuvat kuituhäviöt, joten emulsiota käytettäessä saadaan parempi saanto kuin saippualla /56,58/.
- Erityisesti sanomalehtipaperia siistattaessa emulsioilla päästään vähintäänkin samaan vaaleuden nousuun kuin saippuaa käytettäessä /52,56/.

Toisaalta emulsioiden herkkyys prosessivaihteluille on kuitenkin suurempi kuin saippualla. Varsinkin vaihtelut paperin täyteainepitoisuudessa ja veden kovuudessa vaikuttavat emulsioiden vaahtoamiseen kennoilla /54/.

6.2 Vaahdonmuodostus

Vaahdotussiistauksessa tarvitaan kontrolloitu määrä vaahtoa erottamaan mustepartikkelit kuitu/vesi-suspensiosta ja nostamaan ne kennon pinnalle muodostuvaan vaahtokerrokseen. Kennoon kapeiden kanavien kautta injektoitu ilma hajoaa pieniksi kupliksi kennossa vallitsevista leikkausvoimista johtuen. Välittömästi kennoon joutuessaan pienet kuplat alkavat hävitä niiden yhtyessä suurempiin /59/. Syy tähän on todettavissa Youngin ja Laplacen yhtälöstä:

$$\Delta P = \frac{2 \sigma}{r} \quad (7)$$

jossa	ΔP	on paine-ero kuplan ja ympäröivän liuoksen välillä
	σ	pintajännitys
	r	kuplan säde

Koska paine pienissä kuplissa on suurempi, kaasu virtaa diffuusion johdosta pienistä kuplista suurempiin. Tämä johtaa lopulta suurien kuplien kasvuun pienempien kustannuksella. Tätä tapahtumaa kutsutaan myös englannin kielisellä nimellä Ostwald Ripening /59/. Ilman pinta-aktiivisia aineita kuplien hajoaminen tämän mekanismin mukaisesti on hyvin nopeaa ja siten tärkeimpiä kuplan stabiliteettiin vaikuttavista tekijöistä /59/.

Tarkasteltaessa hyvin pienen kuplan ja sen läheisyydessä olevan huomattavasti suuremman ilmakuplan välistä vuorovaikutusta voidaan todeta, että aika, joka kuluu pienemmän kutistumiseen tietyn kokoiseksi on laskettavissa de Vries:n (1958) yhtälöstä /59/:

$$r_t^2 = r_0^2 - \frac{(4RTDS\sigma)}{Pd} t \quad (8)$$

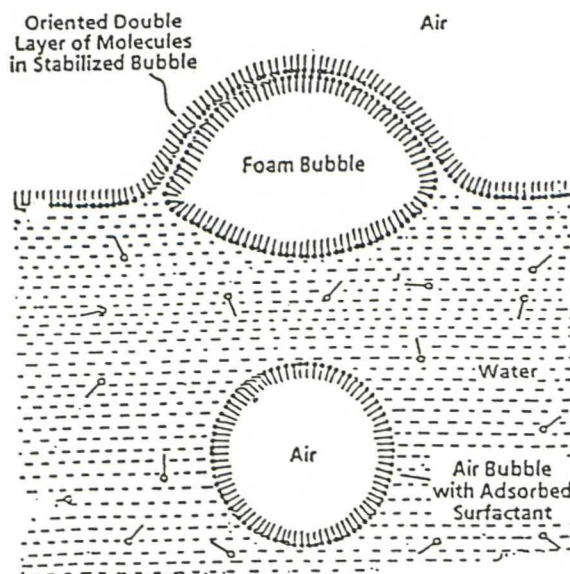
jossa	r_t	on kuplan säde hetkellä t
	r_0	kuplan säde hetkellä $t=0$
	R	kaasuvakio ($= 8,31441 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
	T	lämpötila
	D	kaasun diffuusiokerroin
	S	kaasun liukoisuus ympäröivään liuokseen
	P	kuplan ulkopuolinen paine
	d	kuplien välien etäisyys
	t	aika

Kun kaavaan 8 asetetaan $r_t = 0$, saadaan kuplan teoreettinen elinikä laskettua:

$$t = \frac{r_0^2 Pd}{4RTDS\sigma} \quad (9)$$

Kuplan kutistuminen voi puhtaassa vedessä olla nopeaa, koska veden pintajännitys on korkea ja tavallisten kaasujen liukoisuus veteen on suuruusluokkaa 1-2 mmol/l. Pinta-aktiivisten aineiden adsorboituminen kuplan pintaan alentaa kuitenkin pintajännitystä ja pidentää siten kuplan elinikää /59/.

Pinta-aktiivisen aineen stabiloima vaahdonmuodostusmekanismi on esitetty kuvassa 18. Vesiliuoksessa pinta-aktiivisen aineen molekyylin hydrofobinen osa aiheuttaa vääristymän veden normaaliin rakenteeseen lisäten näin systeemin vapaata energiaa. Systeemin pyrkiessä kohti tasapainotilaa tensidin molekyylit siirtyvät ilma-vesi rajapinnoille ja orientoituvat esimerkiksi ilmakuplan ympärille. Tensidin hydrofobiset ryhmät asettuvat kuplan pinnalle poispäin vesifaasista, hydrofiilien osoittaessa veteen päin /34/.



KUVA 18. Pinta-aktiivisen aineen adsorboitumisesta johtuva ilmakuplan stabiloituminen ja vaahdon muodostuminen /34/.

Pinta-aktiivisten aineiden adsorboituessa ilmakuplien pintoihin kuplat stabiloituvat ja niiden hajoamisnopeus alenee. Tämän ansiosta kuplat ehtivät nousta kennon pintaan ennen hajoamistaan. Ennenaikainen hajoaminen johtaisi vaahdotustehokkuuden heikkenemiseen, sillä sen tuloksena kupliin tarttuneet mustepartikkelit vapautuisivat takaisin kuitusulppuun /34/.

Yleensä vaahdotuskennoon ei tarvitse lisätä erityistä vaahdottajakemikaalia, vaan normaalisti prosessiin lisätyt pinta-aktiiviset aineet vastaavat myös vaahdon muodostuksesta ja stabiloinnista. On olemassa viitteitä, joiden mukaan anioniset pinta-aktiiviset aineet muodostaisivat runsaamman ja stabiilimman vaahdon kuin vastaavat nonioniset tensidit /60/.

7. BIOLOGISET SIISTAUSMENETELMÄT

Perinteisen alkalisia kemikaaleja käyttävän sanomalehtipaperin siistausmenetelmän rinnalle on kehitteillä biologisia pulpperointimenetelmiä, joissa ei tarvittaisi alkalia tai pinta-aktiivisia aineita. Tämä on ollut suuntaus erityisesti Japanissa, jossa jo useamman vuoden ajan on perehdytty entsyymien käyttöön siistauksessa /61/.

Biologisessa siistauksessa käytetyt entsyymit ovat yleensä sellulaaseja tai hemisellulaaseja, joiden on havaittu vaikuttavan edullisesti myös kuitujen mekaanisiin ominaisuuksiin ja suotautuvuuteen. Erityisesti biologisesti siistatun massan suotautuvuuden sekä puhkaisu- ja vetolujuuksien sanotaan olevan paremmat kuin vastaavalla perinteisellä menetelmällä siistatulla massalla /62,63/. Toisaalta entsyymien toimintamekanismista johtuen saantotappiot ja kuituvauriot ovat suurempia kuin perinteisessä siistauksessa.

Entsyymien käytön on myös ilmoitettu vähentävän tarvittavien siistauskemikaalien määrää vaikuttamatta silti epäedullisesti siistauksen tehokkuuteen. Esimerkiksi saavutetut vaaleustasot ovat aivan vertailukelpoisia rasvahapposaippuihin ja synteettisiin tensideihin verrattuna (taulukko 6) /63/.

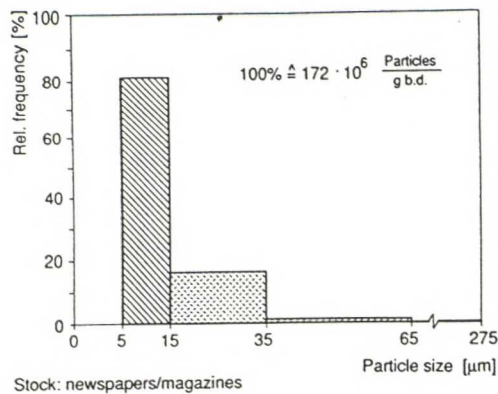
TAULUKKO 6. Biologisella ja perinteisellä siistauksella saavutettuja vaaleustasoja käytettäessä raaka-aineena sanomalehtipaperia /64/.

	Entsyymi	Rasvahapposaippua	Synteettinen displectori
Pulpperoinnin jälkeen	44,0	44,0	44,0
Vaahdotuksen jälkeen	52,6	52,6	51,3
Peroksidivalkaisun jälkeen	62,5	62,3	59,6
Pulpperointiin ja valkaisuun käytetty peroksidi (% H ₂ O ₂)	1,0	2,0	2,0

8. VAAHDOTUSTEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

8.1 Partikkelikoko

Tavanomaisella kemikaaliannostuksella suoritettun sanoma- ja aikakauslehtien sekoituksen pulpperoinnin jälkeen, massa sisältää erittäin suuren määrän mikroskooppisen pieniä mustepartikkeleita (kuva 19) /65/.

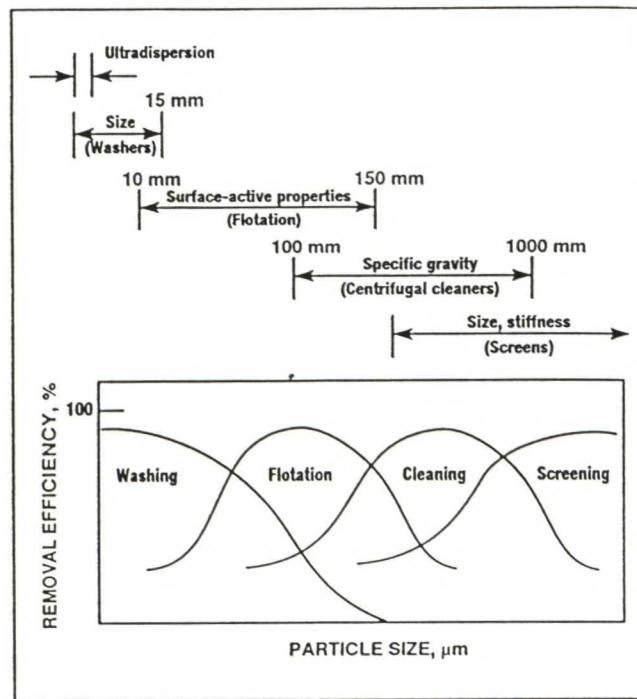


KUVA 19. Mustepartikkelien kokojakauma pulpperoinnin jälkeen /65/.

Tehdyn tutkimuksen mukaan yli 80 % mustepartikkeleista kuului alueeseen 5-15 μm , noin 98 % partikkeleista ollessa pienempiä kuin 35 μm /65/. Ainoastaan alle prosentti partikkeleista oli suurempia kuin 65 μm ja siten paljain silmin nähtävissä.

Vaahdotustehokkuus on suuresti riippuvainen useasta vaikuttavasta mekanismista, joista tärkeimpinä voidaan pitää:

1) Epäpuhtauspartikkelin ja ilmakuplan törmääminen /41/. Kuvasta 20 voidaan todeta, että partikkelin koko on vaahdotuksen kannalta erittäin merkittävä tekijä. Niiden tulee olla riittävän suuria törmätäkseen ja kiinnittyäkseen ilmakupliin. Hydrodynaamisista voimista johtuen todennäköisyys pienten partikkelien (alle 4 μm) kiinnittymiseen ilmakupliin pienenee, sillä pienet partikkelit eivät pääse riittävän lähelle kuplaa vaan virtaavat kuplan ohi siihen törmäämättä /42/.



KUVA 20. Partikkelien kokojakauman vaikutus niiden erottumiseen eri prosesseissa /35/.

2) Epäpuhtauspartikkelin kiinnittyminen kuplan pintaan /41/. Tämän tapahtuminen edellyttää partikkelin ja kuplan välisessä tilassa olevan ylimääräisen veden poistumista sekä lopulta niiden välisen ohuen nestekalvon murtumista. Nesteen viskositeetti ei saa olla liian korkea, jotta se ehtisi virrata pois partikkelin ja kuplan välisestä tilasta sinä lyhyenä kontaktiaikana, jonka partikkeli on kuplan läheisyydessä /66/.

Larsson et al. mukaan epäpuhtauspartikkelien ilmakupliin tarttumisen edellytyksenä on, että partikkelin ja ilmakuplan välinen törmäysenergia on riittävän suuri murtamaan partikkelin ja ilmakuplan välisen nestefilmin /44/. Jotta tämä tapahtuisi, nestefilmillä ei saa olla liian korkeaa elastisuutta, jonka aiheuttavat mm. pintoihin adsorboituneet pintaaktiiviset aineet /44/.

3) Partikkelin ja kuplan välisen kontaktin stabiloituminen ja partikkelin nouseminen kuplan mukana kennon pinnalle muodostuvaan vaahtoon /41/. Tässä vaiheessa on tärkeää, että ilmakupla on pinta-aktiivisten aineiden stabiloima, jolloin se kestää ehjänä kennon pinnalle asti. Mikäli kupla hajoaa liian aikaisessa vaiheessa, epäpuhtauspartikkeli vapautuu takaisin sulppuun.

Todennäköisyys epäpuhtauspartikkelin flotatoitumiselle voidaan esittää seuraavan teoreettisen yhtälön muodossa:

$$P = P_c \times P_a \times P_s \quad (10)$$

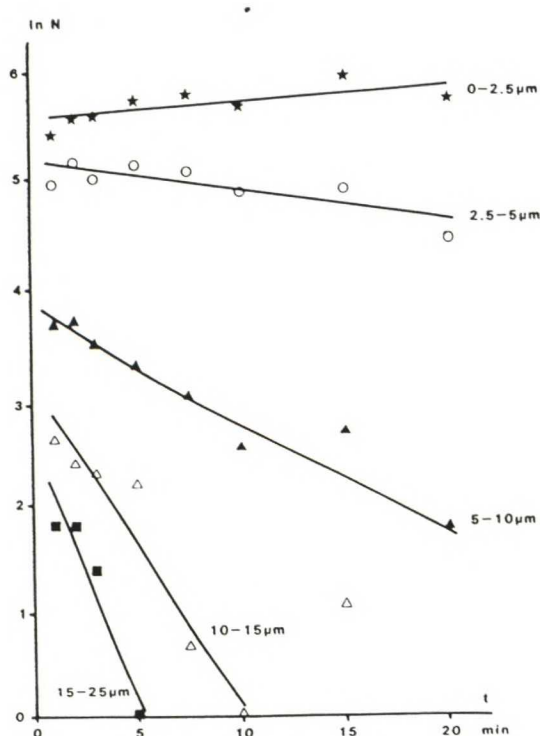
jossa	P_c	on todennäköisyys kuplan ja partikkelin törmäämiselle
	P_a	todennäköisyys partikkelin kiinnittymiselle kuplan pintaan
	P_s	todennäköisyys partikkeli/kupla-systeemin stabiloitumiselle /66/.

Mikäli kennossa vallitsevat dynaamiset olosuhteet ja vaahdon muodostus pysyvät vakioina, voidaan edellisen yhtälön perusteella olettaa partikkelien kiinnittymisellä ilmakupliin olevan eniten vaikutusta vaahdotustehokkuuteen. Tämä taas on suuresti riippuvainen partikkelien pintakemiallisista ominaisuuksista /66/.

Larsson et al. on tutkinut pienten (alle 40 μm) partikkelien vaahdotusta mallikokeiden avulla. Kokeissa havaittiin vaahdotustehokkuuden olevan suuresti riippuvainen painoväripartikkelien koosta. Kuvassa 21 on esitetty erikokoisten mustepartikkelien vaahdotuksen tehokkuus. Vaahdotuksen todettiin myös noudattavan ensimmäisen kertaluvun kinetiikkaa ja olevan tehokkaimmillaan ensimmäisen kymmenen minuutin aikana /42,67/. Yleinen yhtälö vaahdotuksen kinetiikalle voidaan esittää muodossa:

$$\ln N = -k \times t + \ln N_0 \quad (11)$$

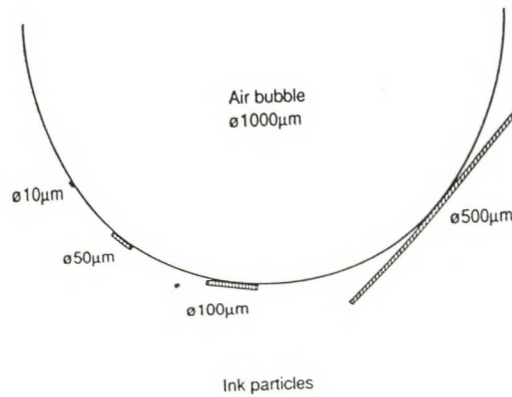
jossa N on laskettujen mustepartikkelien lkm.
 k nopeusvakio
 t reaktioaika
 N_0 mustepartikkelien lkm. hetkellä $t = 0$



KUVA 21. Ensimmäisen asteen kuvaajat erikokoisten mustepartikkelien poistumisesta vaahdotuksessa /42/.

Ilmakuplan halkaisijan suhde partikkelin kokoon nähden on merkittävä tekijä vaahdotuksen onnistumisen kannalta /65/. Kuvassa 22 on esitetty erikokoisten mustepartikkelien kiinnittyminen halkaisijaltaan 1 mm ilmakuplan pintaan. Johtuen ilmakuplan pinnan kaarevuudesta partikkelin ja kuplan välinen kontaktialue pienenee partikkelin halkaisijan kasvaessa. Suuret partikkelit kiinnittyvät ilmakupliin ainoastaan hyvin pieneltä alaltaan, jolloin ne

helposti irtoavat kennossa vallitsevien leikkausvoimien johdosta /65,68/. Samoin suuret partikkelit ovat usein liian painavia, jotta ilmakuplat jaksaisivat kantaa ne kennon pinnalle /45/.



KUVA 22. Malli ilmakuplan ja erikokoisten mustepartikkelien välisestä kontaktialueesta /65/.

8.2 Partikkelin ja ilmakuplan välinen kontaktikulma

Kuplan ja siihen kiinnittyneen partikkelin noustessa sulpun läpi kohti kennon pintaa aggregaattiin vaikuttavat sekä painovoima että kennon virtauksista aiheutuvat leikkausvoimat, jotka helposti irrottavat partikkelin kuplan pinnasta /44/. Näin ollen suurten ja raskaiden partikkelien vaahdotuksen onnistuminen on riippuvainen aggregaattia koossapitävistä voimista.

Vaahdotuksessa vaikuttavien kolmen faasin, kaasu, neste ja kiinteä, keskinäinen vuorovaikutus voidaan ilmaista Young'in yhtälöllä /47/:

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos \theta \quad (12)$$

jossa $\gamma_{s/a}$, $\gamma_{s/w}$ ja $\gamma_{w/a}$ ovat pintaenergiat kiinteä/kaasu, kiinteä/neste ja neste/kaasu rajapinnoissa
 θ on kontaktikulma partikkelin ja ilmakuplan välillä

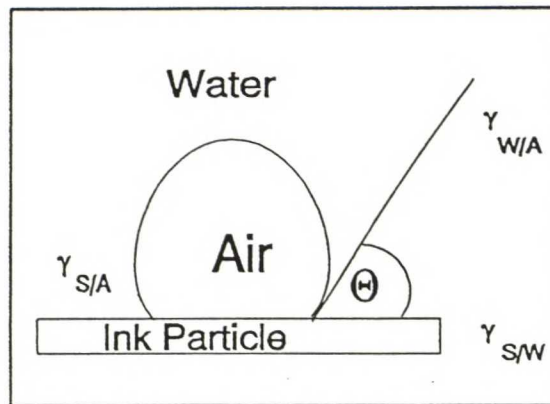
Energia, joka vaaditaan kiinteä/kaasu-rajapinnan rikkomiseen ja kahden erillisen kaasuneste ja kiinteä/neste rajapintojen muodostamiseen eli toisin sanoen partikkelin irrottamiseen kuplan pinnasta tarvittava energiamäärä, voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä:

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} + \gamma_{s/w} - \gamma_{s/a} \quad (13)$$

Kun yhdistetään yhtälöt (12) ja (13) saadaan:

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} (1 - \cos \theta) \quad (14)$$

Yhtälöstä (14) nähdään, että partikkelin ja ilmakuplan välisen kontaktikulman kasvaessa myös $W_{s/a}$ kasvaa ja sitä paremmin aggregaatti kestää siihen kohdistuvia voimia /47/.



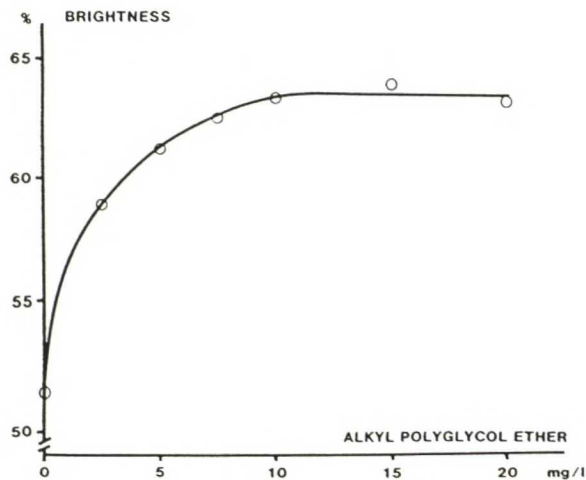
KUVA 23. Epäpuhtauspartikkelin ja ilmakuplan välinen kontaktikulma vesiliuoksessa /47/.

Teoreettisesti ajatellen partikkelin ja ilmakuplan välinen kontakti on siis voimakkaimmillaan kontaktikulman ollessa 90° (kuva 23) /44/. Johtuen suuresta hajonnasta partikkelien suuruudessa, muodoissa ja pintojen epätasaisuuksissa, ei θ :lle voida käytännössä asettaa mitään yksikäsitteistä optimiarvoa. Kontaktikulman tulee kuitenkin olla minimissään noin $50-75^\circ$, jolloin partikkeleilla on vaahdotuksen vaatimat pintakemialliset ominaisuudet /47/.

8.3 Dispergoitujen mustepartikkelien ja kalsiumsaippuan saostuminen kuituihin

Kun painoväri on dispergoitu pieniksi partikkeleiksi, sen uudelleen adsorboituminen kuituihin on aina mahdollista pulpperointia seuraavissa yksikköprosesseissa. Vaahdotuksessa partikkelien kolloidaalinen stabiliteetti on pidettävä alhaisena, jotta ne saataisiin poistettua /42/. Jos repulsiiviset kolloidaaliset voimat ovat liian heikkoja, painoväripartikkelit saostuvat kuitujen pinnoissa oleviin halkeamiin, joissa ne ovat suojassa kennossa vallitsevilta leikkausvoimilta ja niiden poistaminen on käytännössä mahdotonta /69/.

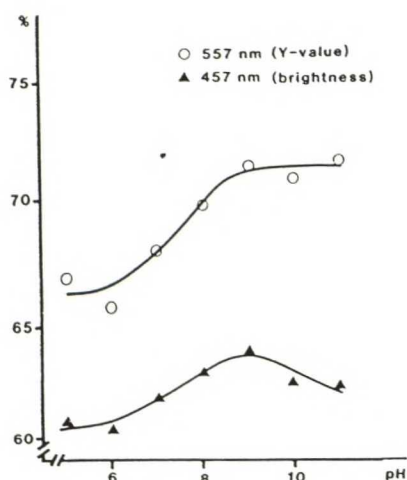
Uudelleensaostumista voidaan tehokkaasti estää alkyylipolyglykolieetteri lisäyksellä (kuva 24). Tämän tyyppisiä nonionisia pinta-aktiivisia aineita käytetäänkin yleisesti dispergointiaineena /69/. Kemikaali adsorboituu mustapartikkelien ja mahdollisesti myös kuitujen pintoihin lisäten partikkelien ja kuitujen välistä steeristä repulsiota /69/.



KUVA 24. Alkyylipolyglykolieetterin konsentraation vaikutus mustepartikkelien uudelleen saostumiseen, joka on todettavissa muutoksena massan vaaleudessa /69/.

Aluminaatin läsnäolon on todettu lisäävän saostuneen musteen määrää, kun silikaatti puolestaan vähentää sitä reagoimalla aluminaatin kanssa. Silikaatti alentaa uudelleensaostumista todennäköisesti myös adsorboitumalla kuituihin ja muodostamalla vesiliukoisen polymeerikerroksen, joka johtaa steeriseen repulsioon kuitujen ja partikkelien välillä /70/.

Myös pH:lla on vaikutusta mustepartikkelien uudelleensaostumiseen, sillä pH:ssa alle 9 saostuminen lisääntyy laskevan pH:n funktiona (kuva 25). Tämä johtuu todennäköisesti laskevan pH:n myötä heikkenevästä partikkelien ja kuitujen välisestä elektrostaattisesta stabilisaatiosta /69/.



KUVA 25. pH:n vaikutus mustepartikkelien uudelleen saostumiseen, joka on todettavissa muutoksena massan vaaleudessa ja Y-arvossa /69/.

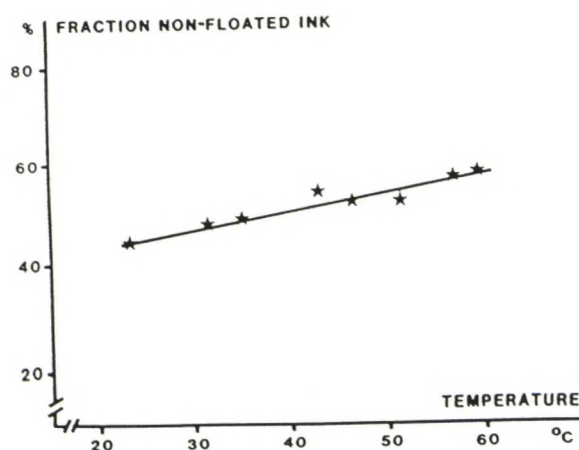
Toinen tuotetun massan laatuun vaikuttava tekijä on kalsiumsaippuan taipumus kulkeutua massan mukana. Useilla tehtailla on todettu, että noin 50 % siistauksessa käytetystä saippuasta seuraa massaa paperikoneille /69/. Normaaaleissa siistausolosuhteissa kuitenkin ainoastaan hyvin pieni osa käytetystä saippuasta saostuu kuituihin. Alhaisissa pH arvoissa saostuminen lisääntyy, mutta ei kuitenkaan siinä määrin kuin paperitehtailla todetut määrät antaisivat odottaa. Kalsiumsaippuan saostuminen kuituihin tapahtuukin todennäköisesti massan sakeutusvaiheessa liuoksen valuessa suotimelle muodostuvan massakakun läpi /69/.

8.4 Prosessimuuttujien vaikutus

Vaahdotustehokkuus on suuresti riippuvainen sekä oikeasta vaahdotuskemiasta että optimoiduista prosessimuuttujista. Vaahdotuksen kannalta merkittäviä muuttujia ovat mm. massan sakeus, lämpötila, pH, vaahdotusaika ja ilmakuplan koko. Kuvissa 26, 27 ja 28 on esitetty Larsson et al. saamia tuloksia flotaatiokokeista, jotka on suoritettu puhtailla väridispersioilla laboratorio-olosuhteissa /42/.

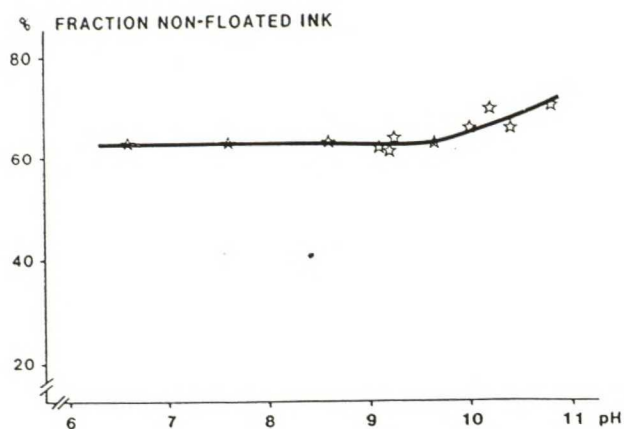
Perinteisessä vaahdotuksessa parhaat vaaleuden nousut saadaan massan sakeuden ollessa 1,0-1,2 %. Näin ollen tavanomaiset vaahdotuskennnot on suunniteltu toimimaan juuri tällä sakeusalueella /19/.

Vaahdotustehokkuus laskee hieman prosessilämpötilan noustessa. Käytännössä parhaaksi lämpötila-alueeksi on osoittautunut 40-45 °C /42/.



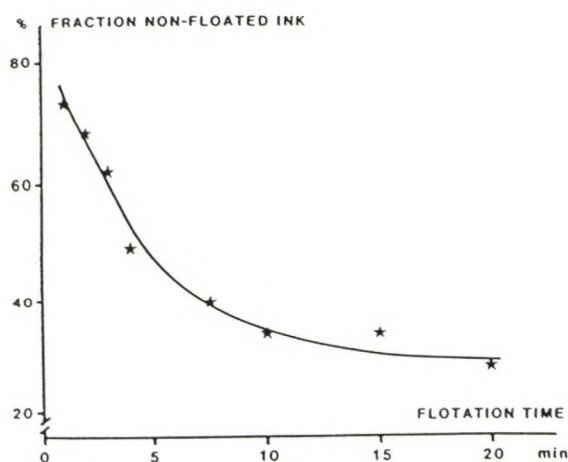
KUVA 26. Vaahdotustehokkuus prosessilämpötilan funktiona /42/.

Vaahdotustehokkuus laskee jonkin verran, kun pH nousee yli 9. Tämän arvon ei alapuolella pH:lla ei ole vaikutusta /42/.



KUVA 27. Vaahdotustehokkuus pH:n funktiona /42/.

Kuten edellä mainittiin, suurin osa poistettavissa olevista painoväripartikkeleista poistuu perinteisessä vaahdotuksessa vaikuttavien voimien johdosta ensimmäisen kymmenen minuutin aikana. Sen jälkeen saadaan poistettua vain pieniä satunnaisia määriä mustepartikkeleita /42/.



KUVA 28. Vaahdotustehokkuus ajan funktiona /42/.

Ilmakuplan halkaisija on merkittävä muuttuja vaahdotuksen kannalta, sillä ainoastaan kuplat, joiden halkaisija on suurempi kuin 0,3 mm, kykynevät tunkeutumaan kuitusulpun läpi kennon pinnalle /65/. Halkaisijaltaan noin 0,1 mm olevilla kuplilla on lisäksi taipumus adsorboitua kuituihin lisäten rejektoituneen kuidun osuutta. Tätä ilmiötä käytetään kuitenkin hyväksi mm. kiertoveden selkeytyksessä /71/.

9. VALKAISU

Siistatun massan valkaisuun voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia kemikaaleja: vetyperoksidi, natriumhydrosulfiitti, kloori ja hypokloriitti sekä mahdollisesti myös formamidiini sulfiinihappo eli FAS /21,24/.

Tietyissä prosessissa käytettävän valkaisukemikaalin valintaan vaikuttavat sekä valkaistava massa että lopputuotteelle asetettu vaaleustavoite. Esimerkiksi yksivaiheinen hypokloriitti-valkaisu on aikaisemmin ollut yleisin menetelmä puuvapaan uusiomassan valkaisussa. Puupitoisten massojen valkaisuun ei delignifioivia klooriyhdisteitä kuitenkaan käytetä johtuen niiden aiheuttamista korkeista saantohäviöistä /72/.

Viime vuosina on kuitenkin klooripohjaisten valkaisukemikaalien käyttöä pyritty vähentämään yleisen suuntauksen mukaisesti. Näin ollen peroksidista ja natriumhydrosulfiitista on tullut yleisimmät uusiomassan valkaisussa käytetyistä kemikaaleista, joiden rinnalla on värillisten puuvapaiden massojen valkaisuun alettu käyttää myös FAS-valkaisua.

KOKEELLINEN OSA

10. TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET

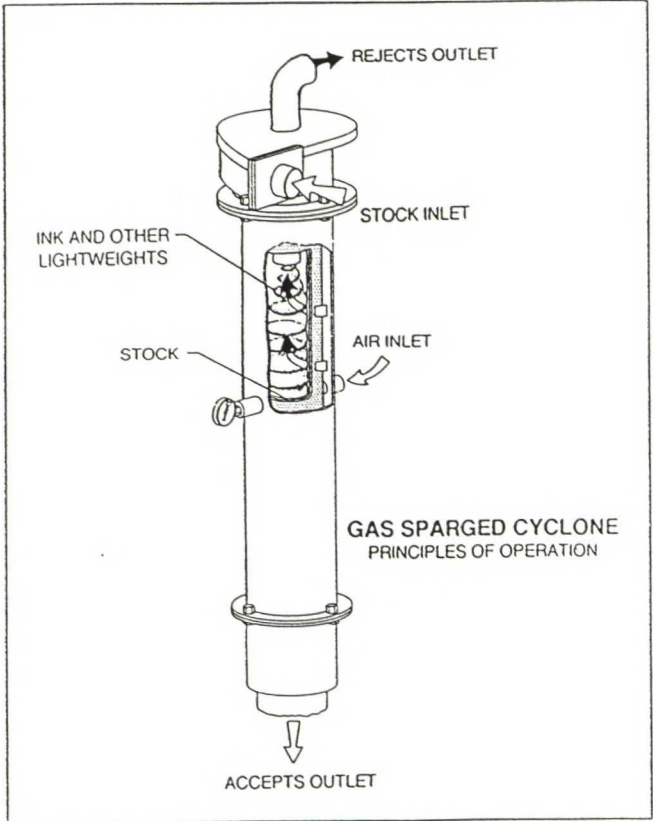
10.1 GSC-hydrosykloni

Gas Sparged Cyclone eli GSC kehitettiin 1980-luvulla alunperin kaivosteollisuuden tarpeisiin Utahin yliopistossa Yhdysvalloissa. Alkuperäinen käyttötarkoitus oli mineraalien vaahdotuksessa ja GSC:n toimintaa tutkittiinkin pienten hiilipartikkelien erotuksessa /73/. Vuonna 1990 Ahlström Kamyra aloitti laitteen soveltuvuuden tutkimisen keräyspaperin siistaukseen ja ensimmäinen teolliseen toimintaan asennettu GSC käynnistettiin 1992 Kieffer Paper Mills siistauslaitoksessa Brownstownissa Indianassa.

GSC:n rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 29. Laite koostuu kahdesta sisäkkäisestä sylinteristä, joiden väliin jää kolmeen päällekkäiseen osaan jaettu ilmarako. Ulko-kuori on uusimmassa sovellutuksessa ruostumatonta terästä ja sisäputki polymeeripohjaista huokoista materiaalia. Koeajoissa käytetyssä tehdasmittakaavaisessa laitteessa huokoinen putki on halkaisijaltaan 150 mm ja sen pituus on noin 1 m. Sisäputken huokokset ovat kooltaan 5-200 μm .

Sulppu syötetään 1-3 % sakeudessa tangentiaalisesti GSC:n yläosaan, jolloin se virtaa ohuena pyörteenä laitteen läpi huokoisen tuubin sisäpintaa myöten. Vaahdotusilma syötetään laitteeseen huokoisen tuubin läpi, jonka ansiosta ilmakuplat jakautuvat tasaisesti sulppuun. Laitteessa vallitsevat keskipakovoimat johtavat muodostuneen vaahdon ja siihen kiinnittyneiden epäpuhtauspartikkelien kerääntymiseen laitteen keskelle syntyvään ilmatilaan, josta vaahto poistuu laitteen yläosassa olevasta rejektiytyhteestä. Aksepti virtaa GSC:n läpi ja otetaan talteen laitteen alaosasta /73/.

Rejektisuhdetta voidaan säätää GSC:n alaosassa olevaa säätörengasta kääntämällä. Säätöosaa nostettaessa akseptiyyhteen aukko pienenee ja laitteen sisällä vallitseva vastapaine kasvaa. Tämä johtaa rejektivirtauksen osuuden kasvuun. Vastaavasti säätöosaa avattaessa laitteessa vallitseva vastapaine alenee ja rejektoituneen sulpun osuus on alhaisempi.



KUVA 29. GSC:n rakenne ja toimintaperiaate /73/.

TAULUKKO 7. GSC:n ja perinteisen vaahdotuskennon välisiä eroja /73/.

	TAVANOMAINEN VAAHDOTUSKENNO	GSC-HYDROSYKLONI
Erotusmekanismi	gravitaatio	keskipakovoima
Massan viipymäaika kennossa	~ 1 minuutti	< 1 s
Ilmakuplan kulkema matka massassa	laitteen koosta riippuen > 60-120 cm	< 0,25 cm
Ilma:massa	0,4:1,0	1,5:1,0
Massan sakeus	1,0 %	1,0-3,0 %

Taulukossa 7 mainituista eroista sekä rejektin poiston erilaisuuksista johtuen on todennäköistä, että myös laitteiden vaahdotuskemikaaleilta vaatimat ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Erityisesti massan korkeasta virtausnopeudesta johtuen GSC:ssä vallitsevat leikkausvoimat ovat huomattavasti rajummat kuin perinteisissä kennoissa. Samoin GSC:n verrattain korkea ilmakerroin tehostaa vaahdonmuodostusta, joka on selvästi runsaampaa kuin tavanomaisessa vaahdotuksessa.

10.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli selvittää millaisia kemiallisia ominaisuuksia GSC:n olosuhteet vaativat vaahdotuskemikaaleilta parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Työssä ei siis pyritty löytämään sitä ainoaa oikeaa kemikaalia, vaan tarkoituksena oli vertailla eri vaahdotuskemikaalityyppien toimintaa optimoiduilla ajoparametreilla. Tämän lisäksi pyrittiin kehittämään esikokeissa ja koeajoissa saatujen tulosten perusteella teoria GSC:n toiminnan mallintamiseksi.

11. KOKEIDEN SUORITUS

11.1 Tutkimuksissa käytetyt GSC-hydrosyklonit

Esikokeissa käytetty muovikuorinen GSC ei ollut sama laite, jolla varsinaiset koeajot ajettiin. Tutkimuksissa käytetyt GSC:t poikkesivat toisistaan mm. dimensioidensa sekä ilmansyötön ja ilmansyöttöyhteiden lukumäärän suhteen. Laitteiden väliset erot on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Tutkimuksissa käytettyjen GSC-hydrosyklonien väliset erot.

	Esikokeissa käytetty GSC	Kemikaalikoeajoissa käytetty GSC
Ilmansyöttö	14:sta pisteestä tangentialisesti	3:sta pisteestä radiaalisesti
Huokoisen putken pituus (mm)	1270	1015
Ulkokuoren materiaali	muovi	teräs

11.2 Esikokeet

Esikokeet ajettiin muovikuorisella GSC:llä Ahlström Machineryn tutkimuskeskuksessa sekä Keräyskuitu Oy:n tiloissa Karhulassa. Niiden avulla selvitettiin GSC:n toimintaa eri ajoparametreilla. Keräyskuitu Oy:llä ajetuissa koeajoissa GSC oli asennettu rinnan Keräyskuitu Oy:n ensimmäisen primäärikennon kanssa, joten koeajot ajettiin samalla raaka-aineella ja kemikaaliannostuksella kuin Keräyskuitu Oy:n omissa Outokumpu-vaahdotuskennoissa. Dispergointi- ja kokooja-aineita annostellaan Keräyskuitu Oy:llä sekä emulsion muodossa pulpperointiin että rasvahapposaippuana juuri ennen vaahdotusta. Esikokeissa käytetty raaka-aine sisälsi 65-75 % sanomalehtiä, 15-20 % aikakauslehtiä ja 5-10 % erilaisia mainoslehtisiä. Esikokeiden ajo-olosuhteet, tulokset ja tuloksista piirretyt kuvaajat on esitetty liitteissä 1-6. Saatujen tulosten perusteella valittiin myös varsinaisissa diplomityön koeajoissa käytetyt ajoparametrit.

11.2.1 Massavirtaus ja syöttösakeus

Tuloksia tarkasteltaessa kiinnitettiin huomiota lähinnä GSC:n musteenpoistotehokkuuteen eli vaaleuden nousuun syöttö- ja akseptivirtausten välillä, sekä kuituhäviöiden pitämiseen mahdollisimman alhaisella tasolla. Syöttösakeuden kasvaessa 1,0 % ylöspäin laitteen musteenpoistotehokkuus paranee tiettyyn optimisakeuteen asti, jonka jälkeen se alkaa

laskea. Optimipisteen jälkeisissä korkeissa sakeuksissa sulppu virtaa tiiviinä kuitumattona GSC:n läpi ja kasvaneet kuituvastusvoimat estävät tehokkaan mustepartikkelien rejektoitumisen.

Optimaalinen syöttösakeus on riippuvainen käytetystä syöttövirtauksesta, sillä lisättäessä syöttövirtausta voidaan myös syöttösakeutta nostaa. Tähän ovat syynä massan virtausnopeuden kasvun myötä GSC:n sisällä vallitsevien keskipakovoimien lisääntyminen, jotka osittain kumoavat korkeasta sakeudesta johtuvat kasvaneet kuituvastusvoimat. Esimerkiksi syöttösakeudessa 2,5 % on tehokkaampaa käyttää syöttövirtausta 950 l/min. Mikäli tavoitteena on kuitenkin mahdollisimman tehokas mustepartikkelien poistaminen eli korkein vaaleuden nousu, on kuitenkin parempi ajaa GSC:tä syöttövirtauksella 750 l/min syöttösakeudessa 2,0 %.

11.2.2 Rejektisuhde ja ilmakerroin

Rejektisuhde laskettiin sekä esikokeissa että varsinaisissa koeajoissa samalla tavalla. Määrittäminen perustui tietynä aikana rejektoituneen ja sisäänsyötetyn materiaalin väliseen tilavuusvirtausten suhteeseen kaavan 15 mukaisesti.

$$R_v = \frac{m}{t \times Q} \times 100\% \quad (15)$$

jossa	R_v	on	tilavuusvirtojen mukainen rejektisuhde [%]
	m		punnittu rejektin massa [kg]
	t		näytteenottoon käytetty aika [s]
	Q		syöttövirtaus [kg/s]

Rejektisuhdetta nostettaessa paranee luonnollisesti GSC:n musteenpoistotehokkuus, mutta samalla lisääntyy myös rejektoituneen kuidun osuus. Tarkasteltaessa vaaleuden muutosta rejektisuhteen funktiona, havaitaan muutoksen olevan suurimmillaan rejektisuhteen noustessa 8 %:sta 10 %:iin. Rejektisuhteen edelleen kasvaessa vaaleuden muutos hidastuu

kuituhäviöiden muodostuessa liian suuriksi. Optimaaliseksi arvoksi on näin ollen valittu rejektisuhde 12 %.

Ilmakertoimet laskettiin ilmakehän paineessa ja virtausta säädettiin rotametreillä ilman-syöttöpaineeseen perustuvan korjauskertoimen mukaisesti. Korjatun ilmavirtauksen ja korjauskertoimen laskeminen on esitetty kaavoissa 16 ja 17 /74/.

$$\dot{V} = K \times \dot{V}_{\text{eqv}} \quad (16)$$

$$K = \sqrt{\frac{(P_e + 1,013) \times 293}{(273 + t) \times \rho_0 \times 1,013}} \quad (17)$$

joissa	\dot{V}	on	todellinen ilmavirtaus
	\dot{V}_{eqv}		rotametrin lukema
	K		korjauskerroin
	P_e		ilman syöttöpaine [bar]
	t		ilman lämpötila [°C]
	ρ_0		kaasun tiheys (ilmalla = 1)
	1,013		normaali ilmanpaine [bar]
	293 ja 273		lämpötila [K]

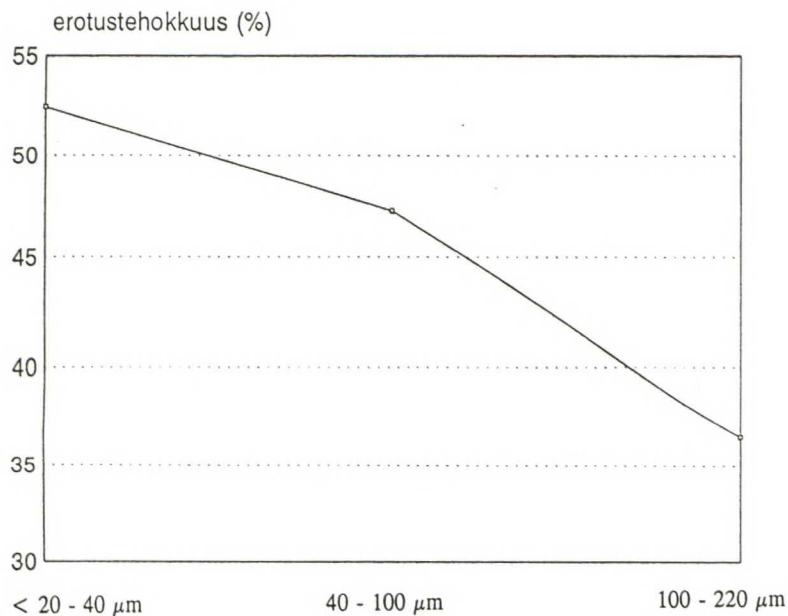
Koeajojen perusteella riittävä ilmakerroin on noin 1,5* syöttövirtaus. Ilmakertoimen nostaminen tätä suuremmaksi ei parantanut GSC:n musteenpoistotehokkuutta.

11.2.3 Yhteenveto esikokeista

Esikokeiden perusteella valittiin varsinaisissa koeajoissa käytetyt ajoparametrit, jotka olivat seuraavat:

- syöttövirtaus	750 l/min
- syöttösakeus	2,0 %
- massan syöttöpaine	n. 0,8 bar
	.
- rejektisuhde	12 %
- ilmakerroin	1,5* syöttövirtaus
- ilmanpaine	150 KPa

Esikokeissa tarkkailtiin myös erikokoisten partikkelien erottumisen tehokkuutta vallinneissa olosuhteissa. Saatujen tulosten perusteella voitiin todeta GSC:n poistavan erityisen hyvin juuri kaikkein pienimpiä partikkeleita, joilla on suurin vaikutus massan vaaleuteen. Kuvassa 30 on esitetty yllä mainituilla ajoparametreillä saadut erotustehokkuudet erikokoisille partikkeleille.



KUVA 30. Esikokeissa saavutetut erikokoisten partikkelien erotustehokkuudet koeajoihin valituilla optimiajoparametreillä.

11.3 Koesuunnitelma

11.3.1 Raaka-aine

Raaka-aineena käytettiin sanomalehtien ja aikakauslehtien 70/30 % seosta, joka hankittiin paikalliselta jätepaperin kerääjältä. Sanomalehtipaperi oli haettu suoraan aina samasta painotalosta (Esan kirjapaino Oy, Lahti) juuri ennen kutakin koeajoa, jolloin voitiin olettaa sen olleen samanikäistä ja painatukseltaan samanlaista kaikissa kokeissa. Aikakauslehdet olivat suhteellisen samanikäistä kotikeräyspaperia. Raaka-aineen toimittaja lajitteli ja paalasi homogeenisen seoksen juuri ennen jokaista koeajoa. Tämän tarkoituksena oli eliminoida raaka-aineen iän ja koostumuksen mukanaan tuomat vaihtelut kokeiden tuloksiin.

11.3.2 Virtausjärjestelyt tutkimuskeskuksessa

Koeajot ajettiin Ahlström Machineryn tutkimuskeskuksessa (FFRC) Karhulassa. Koeajojen virtauskaavio on esitetty kuvassa 31. Raaka-aine pulperoititiin pilot Fibreflow-kuidutusrummulla, jonka rakenne ja toimintaperiaate on esitetty edellä kappaleessa 3.1 Pulperointi. FFRC:ssä olevan pilot Fibreflow-kuidutusrummun tärkeimmät mitat ovat seuraavat:

- Halkaisija	2,25 m
- Kuidutusosan pituus	1,85 m
- Lajitteluosan pituus	0,75 m
- Sihdin reikäkoko	7 mm
- Kehänopeus	2,1 m/s
- Rummutettava määrä	max. 150-200 kg/panos
- Käyttö	hydraulinen

Pulperointi tapahtui 12 % sakeudessa ja 45 °C lämpötilassa. Kuidutukseen käytetty aika oli 20 minuuttia. Rummutusveden lisäyksen jälkeen massan joukkoon lisättiin normaalissa uusiomassaprosessissa käytettyjä kemikaaleja seuraavin annoksin:

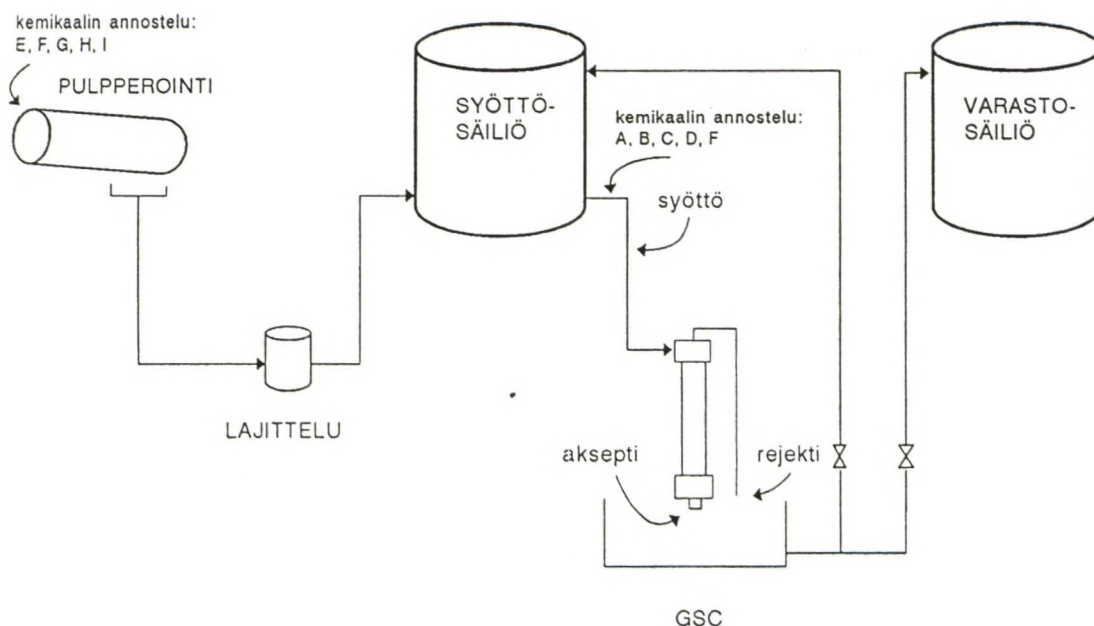
- NaOH	1,0 % (pH 10)
- Vesilasi	2,0 %
- Peroksidi	1,0 %
- DTPA	0,2 %

Kemikaalien annostukset perustuivat teollisten siistauslaitosten yleisesti käyttämään pulperikemiaan ja ne on laskettu prosentuaalisena osuutena aktiivia kemikaalia raaka-aineen kuiva-ainepitoisuudesta. Nämä olosuhteet pidettiin vakioina kaikissa koeajoissa, mutta koepisteittäin lisättiin pulpperointiin myös kemikaalitoimittajien suosittelemaa dispergointikemikaalia.

Pulpperoinnin jälkeen sulppu karkealajiteltiin (\varnothing 2 mm) MODUScreen C2H painelajittimella suurimpien epäpuhtauksien poistamiseksi, jonka jälkeen massa ohjattiin varastosäiliöön ja laimennettiin 2,0 %:n sakeuteen. Veden kovuuden säätöön tarvittu CaCl_2 lisättiin sulppuun vasta GSC:n syöttösäiliössä kunkin koeajon alussa, jottei se vaikuttaisi pulpperointiin.

Kutakin koeajoa varten valmistettiin sulppua 10 m^3 , jolloin tarvittavien näytteiden ottoon jäi aikaa noin 10 minuuttia. Käytettävissä olevan ajan maksimoimiseksi syöttövirtaus ja rejektisuhde säädettiin kohdalleen ennen kemikaaliannostuksen aloittamista, jolloin sulppu voitiin kierrättää takaisin syöttösäiliöön. Kemikaalisyötön aikana sulppu ohjattiin toiseen säiliöön kemikaalien rikastumisen estämiseksi.

Testattavat kemikaalit annosteltiin joko suoraan pulperiin tai juuri ennen GSC:tä. Annostelu massansyöttölinjaan tapahtui massapumpun imupuolelta kalibroidulla annostelupumpulla. Kemikaalin annostelun alettua tarkastettiin GSC:n rejektisuhde vielä kertaalleen, sillä esimerkiksi voimakkaasti vaahtoava kemikaali nostaa rejektoituneen materiaalin määrää. Mikäli rejektisuhde oli muuttunut radikaalisti etukäteen asetetusta arvosta, voitiin säätöruuvien asentoa vielä arviosta muuttaa. Näytteiden oton jälkeen rejektisuhde tarkistettiin vielä kerran, mikäli ruuvia jouduttiin säätämään.



KUVA 31. GSC-koeajojen virtauskaavio tutkimuskeskuksessa.

11.3.3 Tutkitut kemikaalit

Koeajoihin pyrittiin valitsemaan kemikaaleja, jotka olisivat kemiallisilta ominaisuuksiltaan ja vaikutusmekanismeiltaan erilaisia. Valitut kemikaalit olivatkin edustava otos tällä hetkellä yleisesti teollisessa käytössä olevista siistauskemikaaleista, joiden lisäksi kokeiltiin muutamaa täysin tavanomaisesta siistauskemiasta poikkeavaa ratkaisua. Tutkitut kemikaalit olivat rasvahappoja, semisynteettisiä ja synteettisiä tensidejä, joiden tarkempi kuvaus ja annostus on esitetty seuraavassa:

Rasvahappopohjaiset saippuat (kirjallisuusosa kappale 6.1.1)

Rasvahapon jodiluku kuvaa hydrofobisessa ketjussa olevien kaksoissidosten määrää, joka vaikuttaa suoraan kemikaalin vaahtoamis- ja kokoojaominaisuuksiin. Tavanomaisissa vaahtotuskennoissa käytetyn rasvahapon jodiluku on 25 ja näissä koeajoissa se toimikin eräänlaisena referenssipisteenä GSC:n ja perinteisen kennon välillä.

- Rasvahapot jodiluvuiltaan 10, 25 ja 50
- Annostus: 0,8 % GSC:n syöttöpumpun imupuolelle lisättynä
- Veden kovuus 14 dH°
- Pulpperointiin lisättiin dispergointiaineksi 0,05 % nonionista tensidiä.

Semisynteettinen kokooja (kirjallisuusosa kappale 6.1.3)

Koeajoissa tutkittiin kahden eri kemikaalitoimittajan valmistamia emulsioita, joista ensimmäinen sisälsi noin 25 % rasvahappoja ja synteettisiä tensidejä sekä 75 % vettä.

- Emulsio nro. 1
- Annostus: 0,35 % pulpperointiin lisättynä
- Veden kovuus 4-5 °dH

Toinen tutkittu emulsio on yleisesti siistaamoiden käyttämä dispergointi- ja kokooja-aine. Emulsiosta oli rasvahappoja noin 23 %, synteettisiä tensidejä 1-2 % ja vettä 75 %. Tällä emulsiolla ajettiin kaksi koeajoa, joissa kokeiltiin kemikaalin annostelupaikan vaikutusta sen tehokkuuteen.

- Emulsio nro. 2
- Annostus: - 1,0 % suoraan pulpperointiin
- 0,7 % pulpperointiin ja 0,3 % GSC:n syöttöpumpun imupuolelle lisättynä
- Veden kovuus 5 dH°

Kolmas tähän ryhmään kuuluva semisynteettinen vaahdotussiistauksessa käytetty kemikaali koostui polyalkyleenioksidin johdannaisista ja rasvahapoista.

- Emulsio nro. 3
- Annostus: 0,25 % lisättynä suoraan pulpperointiin
- Veden kovuus 9 dH°

Synteettiset tensidit (kirjallisuusosa kappale 6.1.2)

Tutkitut kemikaalit olivat täysin synteettisiä, joiden toimintaan prosessiveden kovuudella ei ollut vaikutusta. Näin ollen erillistä CaCl_2 :n lisäystä ei tarvittu. Molemmat kemikaalit lisättiin suoraan rummutusveteen ennen jätöpaperin annostelua.

- Synteettinen tensidi nro. 1
- Annos 0,20 % lisättynä suoraan pulpperointiin
- .
- Synteettinen tensidi nro. 2
- Annos 0,10 % lisättynä suoraan pulpperointiin

Edellisten lisäksi ajettiin myös ns. nollakoe, jossa ei käytetty pinta-aktiivisia aineita. Pulpperointi tapahtui vastaavasti kuin varsinaisissa koeajoissa, mutta ilman dispergointia-aineita.

Jatkossa kyseisistä kemikaalikoeajoista käytetään seuraavia lyhenteitä:

A	rasvahappo jodiluvultaan 10
B	rasvahappo jodiluvultaan 25
C	rasvahappo jodiluvultaan 50
D	Emulsio nro. 1
E	Emulsio nro. 2 / annosteltuna pelkästään pulpperiin
F	Emulsio nro. 2 / annostelu sekä pulpperiin että juuri ennen GSC:tä
G	Emulsio nro. 3
H	Synteettinen tensidi nro. 1
I	Synteettinen tensidi nro. 2
O	nollakoe ilman kemikaaleja

11.3.4 Näytteiden otto ja käytetyt analyysimenetelmät

Pulpperoinnin jälkeen otettiin jokaisesta sulppuerästä näyte, josta määritettiin sulpun sisältämien eräiden raskasmetallien pitoisuudet Hans Ahlströmin laboratoriossa Karhulassa. Käytetty menetelmä on esitetty liitteessä 7. Määritetyt metallit olivat Mn, Fe, Cu ja Ni, joiden on todettu katalysoivan voimakkaasti peroksidin hajoamista [29]. Näiden metallien pitoisuuksien määrittämisen myötä pystyttiin kontrolloimaan lähinnä sulppuerien tasalaatuisuutta sekä käytetyn kelatointiaineen annoksen riittävyyttä.

Jokaisessa koeajossa otettiin näytteet kemikaaliannostuksen käynnistämisen jälkeen GSC:n syöttö-, aksepti- ja rejektivirtauksista. Tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi otettiin rinnakkaisnäytteitä kaikkiaan viisi kappaletta noin minuutin välein.

Tutkittujen kemikaalien tehokkuutta testattiin taulukossa 9 esitettyjen analyysimenetelmien avulla. Analyysit tehtiin Ahlström Machineryn FFRC:n laboratoriossa.

Taulukossa esitettyjen analyysien lisäksi määritettiin akseptinäytteen suodoksen likaisuus, jolloin pystyttiin vertailemaan kemikaaleja keskenään ja arvioimaan kuinka ne toimisivat normaalissa teollisessa ympäristössä. Akseptin suodoksessa olevat irralliset likapartikkelit rikastuvat nopeasti siistauslaitoksen kiertoveteen johtaen siistaus tehokkuuden heikkenemiseen. Suodoksen likaisuuden määrittämisessä käytetty menetelmä on esitetty liitteessä 7.

Koeajoissa käytettyjen kemikaalien vaikutusta vaahdon muodostukseen ja stabilointiin pyrittiin selvittämään pintajännitysmittausten avulla. Mittaukset tehtiin Teknillisen korkeakoulun puunjalostustekniikan laitoksella KSV Sigma 70 tietokoneohjatulla pintajännitysmittarilla. Mittauksissa käytetty menetelmä on esitetty liitteessä 7.

Saatuja tuloksia vertailtiin myös koeajojen kanssa rinnan suoritettuihin laboratoriovaahdotuksiin, jotka tehtiin Outokummun laboratorioskennolla. Neljän ensimmäisen kemikaalin Outokumpu-vaahdotus tehtiin kemikaalitoimittajan omalla kennolla ja loput kemikaalit testattiin KCL:n laboratoriossa Otaniemessä. Laboratoriovaahdotuksista analysoitiin

rejektin osuus sekä vaaleuden muutos kennon yli. Laitteiston kuvaus ja käytetty menetelmä on esitetty liitteessä 7.

Kunkin koeajon syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä tehtiin myös katseluarkit standardin KCL 26b:74 mukaisesti. Nämä arkit on esitetty liitteessä 8.

TAULUKKO 9. Koeajoista saaduille syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteille tehdyt analyysit ja käytetyt menetelmät.

MÄÄRITYS	MENETELMÄ	SYÖTTÖ	AKSEPTI	REJEKTI
Sakeus	SCAN-C17:64	X	X	X
Massavirtaus	Instrumentointi	X		
Lämpötila		X		
Paine		X		
pH	Esitetty liitteessä 7	X		
Vaaleus	SCAN-C21:75	X	X	X
Mustepartikkelien kokojakauma	Esitetty liitteessä 7	X	X	
Tuhkapitoisuus	Esitetty liitteessä 7	X	X	X
Tahmo-analyysi	Esitetty liitteessä 7	X	X	X
Kuidunpituus	KCL 225:89	X	X	X
Canadian-Freeness	SCAN-C21:65		X	

Ajon A muita korkeampaan rejektisuhteeseen oli syynä kemikaalin runsas vaahtoaminen, joka nosti ennen kemikaalin annostelun aloittamista säädetyn rejektisuhteen huomattavasti korkeammaksi. Koeajoon käytettävissä olleen ajan rajallisuudesta johtuen ei rejektisuhdetta ehditty säätää uudelleen kohdalleen vaan säätöruuvia käännettiin arviosta alaspäin. Tämä arvio osoittautui kuitenkin näytteiden oton jälkeisessä tarkastuksessa riittämättömäksi.

Koeajoissa eri valmistajien toimittamilla emulsioilla oli havaittavissa voimakasta mustepartikkelien agglomeroitumista, joka ilmeni suhteellisten suurten mustepartikkelikasautumien keräytymisenä näyteastioiden pinnalle. Ajossa E ilmiö havaittiin, kun koeajo GSC:llä siirtyi pulpperointia seuraavaan päivään. Mustepartikkelien agglomeroituminen oli niin voimakasta, että se johti jopa massan lähtövaaleuden nousuun. Todennäköisesti tämä ilmiö johtui liian alhaisen kovuuden myötä emulsion sisältämän rasvahapon saippuoitumisesta Na-saippuaksi ja sen toimimisesta pesuaineena.

Suurten mustepartikkelikasautumien esiintymisen johdosta ajo uusittiin ja GSC-koeajo tehtiin välittömästi pulpperoinnin jälkeen, jolloin musteen agglomeroitumista ei tapahtunut. Tässä työssä esiintyvät tulokset ovat peräisin koeajon E uusinta-ajosta. Tapahtuneen johdosta kaikki koeajot, joissa kemikaalin annostelu tapahtui pulpperiin, ajettiin välittömästi rummutuksen jälkeen.

Sanomalehtipaperin ollessa kaikissa koeajoissa samanlaista, erot metalli-ionipitoisuuksissa koeajojen kesken johtuvat suurimmaksi osaksi käytetyn aikakauslehtipaperin täyteainepitoisuuden vaihteluista. Koeajoissa käytetyt aikakauslehdet olivat kotikeräyspaperia, joten eri ajojen kesken tämän jakeen laadussa saattoi olla suuriakin eroja. Erilaisia metalli-ioneja esiintyy epäpuhtautena täyteaineissa ja etenkin kaoliinin laatu voi vaihdella huomattavasti. Koeajojen sulpuista mitatut metalli-ionipitoisuudet on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Sulppujen metalli-ionipitoisuudet.

Metalli (ppm)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fe	400	300	300	580	320	450	460	380	240
Mn	50	50	50	40	60	50	40	50	50
Cu	30	20	30	40	20	20	30	30	30
Ni	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

Vertailtaessa koeajoissa mitattuja sulppujen raskasmetallipitoisuuksia työn kirjallisuusosassa (5.3 Kelaatit) esitettyihin pohjois-amerikkalaisista ja eurooppalaisista siistauslaitoksista mitattuihin vastaaviin arvoihin, voidaan todeta saatujen tulosten olevan täysin vertailukelpoisia yleisen tason kanssa. Etenkin huomioitaessa, että taulukossa 2 esitetyt eurooppalaisista massoista määritetyt pitoisuudet ovat peräisin sulpuista, joiden valmistukseen oli käytetty 50 % aikakauslehtiä.

Arvioitaessa koeajoihin annostellun kelatointiaineen riittävyttä on syytä muistaa, että koeajoen pulpperoinneissa käytetyt kemikaalit annostuksineen valittiin yleisesti siistauslaitosten käytössä olevien mallien mukaisiksi. Edellisen perusteella voidaan siis olettaa koeajoissa käytettyjen kelatointiaineen ja silikaatin annosten olleen todennäköisesti riittävät metalli-ionien aiheuttaman peroksidin hajoamisen estämiseksi.

13. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

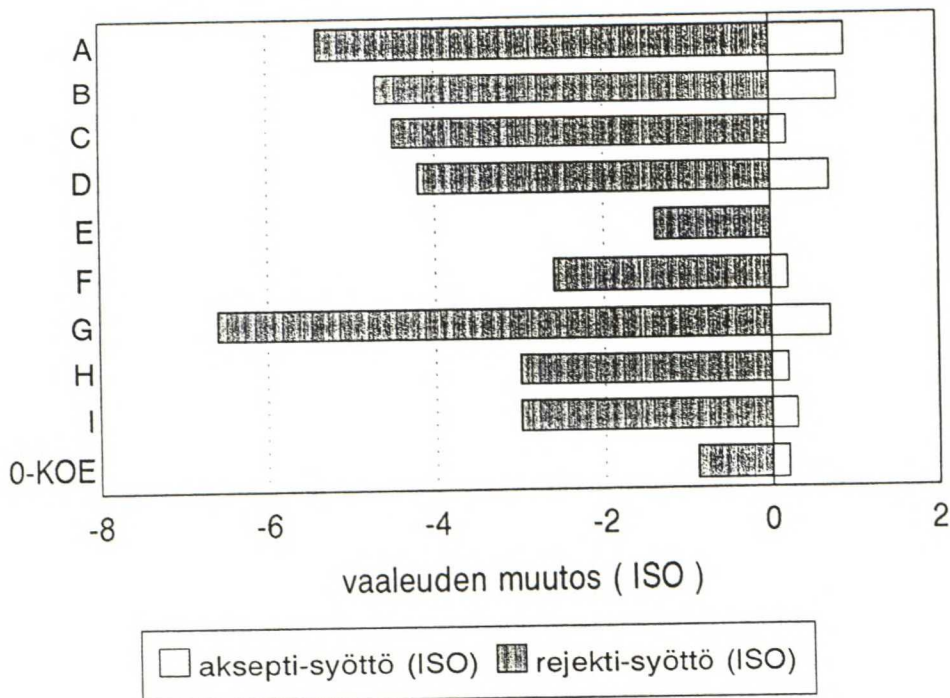
Työn ollessa luonteeltaan lähes uuden vaahdotusmenetelmän vaatiman flotaatiokemian perustutkimusta, ei saatuja tuloksia pystytty vertailemaan aikaisempien tutkimustulosten kanssa. Tämän johdosta on tulosten tarkastelussa jouduttu keskittymään lähinnä tuloksiin vaikuttaneiden syiden pohtimiseen.

Mittauksissa saadut tulokset on esitetty liitteessä 9.

13.1 Vaaleus ja akseptimassojen suodosten likaisuus

Koeajoissa saavutetut vaaleuden nousut GSC:n yli olivat selvästi heikompia kuin Keräyskuitu Oy:llä ajetuissa esikokeissa. Tämä oli yllättävää, sillä normaalisti laboratorio-oloissa tehdyistä testeistä saadaan parempia tuloksia kuin käytännössä. Todennäköisesti tähän on vaikuttanut Keräyskuitu Oy:n kiertovesiin rikastuneet vaahdotuskemikaalit ja hienoaineet, jotka omalta osaltaan lisäsivät mm. vaahtoamista GSC:ssä.

Kuvasta 32 nähdään kuitenkin, että käytettyjen kemikaalien välillä oli kuitenkin selviä eroja, jotta ne pystyttiin asettamaan musteenpoistotehokkuuden mukaiseen paremmuusjärjestykseen. Koeajoissa saatuihin vaaleuden muutoksiin on tosin saattanut vaikuttaa myös syöttömassan vaaleus, joka erityisesti koeajossa I ja ilman vaahdotuskemikaaleja ajatussa nollakokeessa oli huomattavasti korkeampi kuin muissa kokeissa. Vertailtaessa eri koeajoissa saatujen akseptimassoista eristettyjen suodosten likaisuutta, voitiin havaita myös niissä olevan merkittäviä eroja. Kuvassa 33 on esitetty koeajoissa saatujen akseptimassojen suodoksista määritetyt ISO-vaaleudet.



KUVA 32. Koeajoissa saavutetut ISO-vaaleuden muutokset syöttö- ja akseptivirtausten sekä syöttö- ja rejktivirtausten välillä.

Koeajoissa A ja B käytettyjen rasvahappojen jodiluvut olivat 8,9 ja 22,8. Aikaisemmin esitetyn teorian mukaisesti tällaisten kovetettujen rasvahappojen olisi pitänyt olla heikosti vaahtoavia ja antaa pienen rejektimäärän. GSC:n olosuhteissa tilanne oli kuitenkin aivan päinvastainen, sillä näiden kemikaalien muodostama vaahto oli huomattavasti runsaampaa kuin esimerkiksi rasvahapolla, jonka jodiluku oli 55,4 (koeajo C). Samasta syystä alhaisemman jodiluvun omaavilla rasvahapoilla päästiin myös parempaan lopputulokseen. Koeajossa C käytetty erittäin pehmeä rasvahapposaippua ei GSC:n olosuhteissa kyennyt muodostamaan kunnollista vaahtoa, vaan tuloksena oli lähinnä pienikuplaista kuohaa, joka ei edistänyt musteen poistumista.

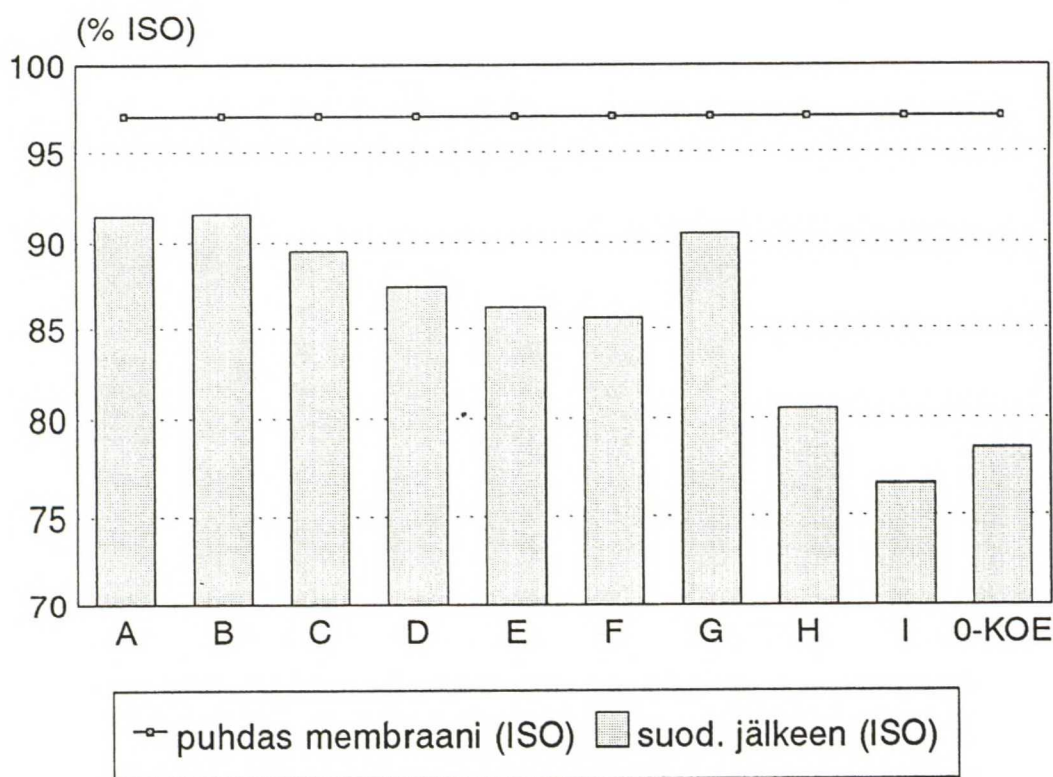
Koeajoissa D ja E emulsioita annosteltiin pelkästään pulpperointiin, jolloin tapahtuneen voimakkaan agglomeroitumisen perusteella voidaan todeta niiden molempien edistävän erinomaisesti mustepartikkelien irtoamista kuiduista, antaen näin hyvät edellytykset musteen poistumiselle flotaatiossa. Pulpperoinnissa molemmat emulsiot toimivat siis lähestulkoon samalla tavalla. Niiden välinen ero tuli kuitenkin selvästi esiin vaahdotuksessa, jossa kemikaali D toimi selvästi paremmin. Ero johtui todennäköisesti emulsion D voimakkaammasta vaahtoamisesta GSC:ssä, joka johti myös parempaan musteenpoistotehokkuuteen. Oletettavasti kemikaalin E annostus oli liian pieni riittävän runsaan vaahdon muodostamiseksi.

Toisaalta on myös mahdollista, että emulsio E menetti osan tehostaan pulpperoinnin ja vaahdotuksen välisessä viivessä. Sillä koeajossa F, joka ajettiin samalla emulsiolla jakamalla kemikaalin annostus pulpperoinnin ja vaahdotuksen kesken, oli vaaleuden nousu GSC:n syöttö- ja akseptivirtausten välillä hieman parempi kuin kuin ajossa E. Ero on kuitenkin niin pieni ettei siitä vielä voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Sen sijaan tarkasteltaessa syöttö- ja rejektivirtausten välisiä vaaleuseroja, havaitaan rejektin olevan ajossa F huomattavasti tummempaa. Molemmissa koeajoissa kuiturejektin osuus oli lähestulkoon samaa luokkaa, joten silläkään ei voinut olla kovin suurta vaikutusta rejektin vaaleuteen. Näin ollen voidaan todeta musteenpoistotehokkuuden olleen ajossa F jonkin verran parempi. Tämä osoittaisi, että annostelun jakamisesta olisi kuitenkin ollut hyötyä.

Koeajo G vahvisti jo aikaisemmin tehtyjä havaintoja kemikaalin vaahtoamisen ja GSC:n musteenpoistotehokkuuden välisestä yhteydestä. Ajojen aikaisiin silmämääräisiin havaintoihin perustuen tämän semisynteettisen flotaatiokemikaalin stabiloima vaahtoaminen oli kaikkein runsainta. Tämä oli myös todennäköisesti syynä koeajossa saatuihin hyviin tuloksiin. Erityisesti vertailtaessa syöttö- ja rejektijakeiden vaaleuksia koeajojen kesken voidaan todeta musteenpoistotehokkuuden olleen parhaimmillaan juuri ajossa G.

Koeajoissa H ja I käytetyillä synteettisillä tensideillä saadut vaaleuden muutokset olivat hieman parempia kuin yleisesti siistaamoissa käytetyllä emulsiolla E. Koeajojen aikaisten silmämääräisten havaintojen perusteella tähän oli syynä näiden kemikaalien hieman runsaampi vaahtoaminen, joka ei kuitenkaan ollut riittävä tehokkaaseen mustepartikkelien poistoon. Näin ollen nämä synteettiset pinta-aktiiviset aineet toimisivat todennäköisesti hieman paremmin suuremmilla annoksilla.

Akseptimassojen suodosten likaisuuksia tarkasteltaessa on selvästi havaittavissa yhtäläisyyksiä korkeimpien vaaleuden muutosten ja puhtaimpien suodosten välillä. Tämä on selvä osoitus parhaiten toimineiden kemikaalien hyvistä kokoojaominaisuuksista. Hyvin toimivan kokoojan ansiosta sulpussa vapaana olevat muste- ja kolloidaaliset täyteainepartikkelit ovat agglomeroituneet riittävän suuriksi, jolloin suuri osa niistä on saatu poistettua vaahdotuksessa tai viimeistään massan suodatuksessa. Sen sijaan esimerkiksi nollakokeessa, jossa ei käytetty minkäänlaista kokoojakemikaalia, akseptimassasta eristetty suodos on erittäin likaista ja sameaa johtuen juuri pienten epäpuhtauksien kulkeutumisesta suodoksen mukana. Näin ollen nollakokeesta saatu tulos toimii hyvänä referenssinä vertailtaessa eri kemikaalien ominaisuuksia toisiinsa. Tämä tulee erittäin hyvin esiin juuri ajojen H ja I kohdalla, joissa saadut tulokset osoittavat kemikaalien kokoojaominaisuuksien olevan lähes olemattomat. Voidaan siis olettaa, että näiden kemikaalien vaikutuksesta tapahtuva musteenpoisto perustuu ainoastaan kemikaalien muita hieman runsaampaan vaahtoamiseen.



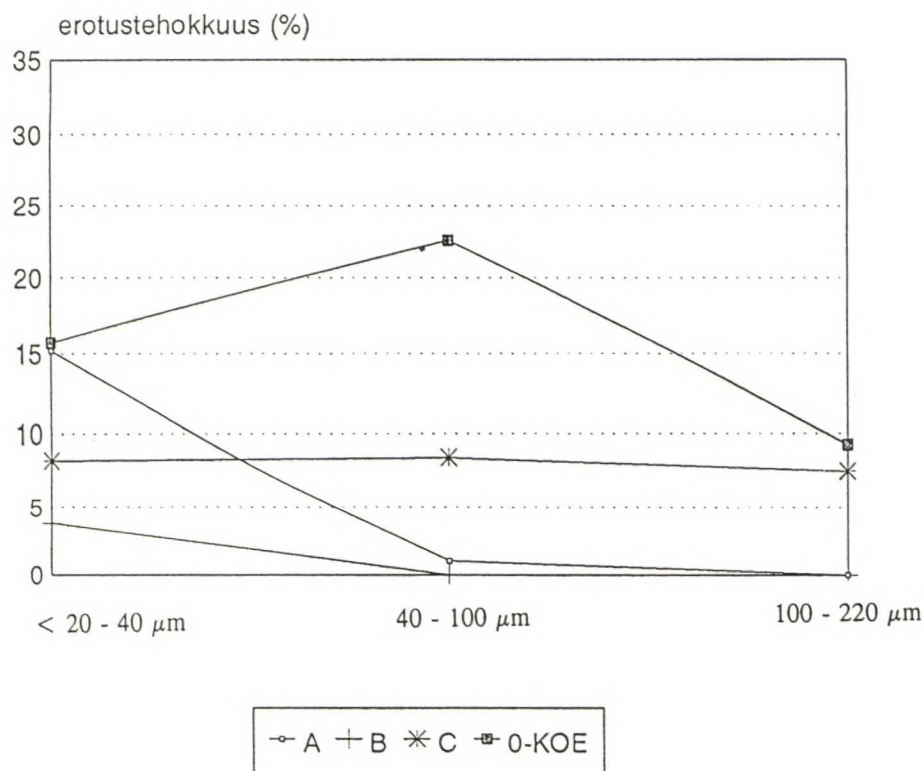
KUVA 33. Koeajojen akseptimassoista erotettujen suodosten vaikutus selluloosanitraattimembraanin vaaleuteen.

13.2 Erikokoisten partikkelien erotustehokkuus

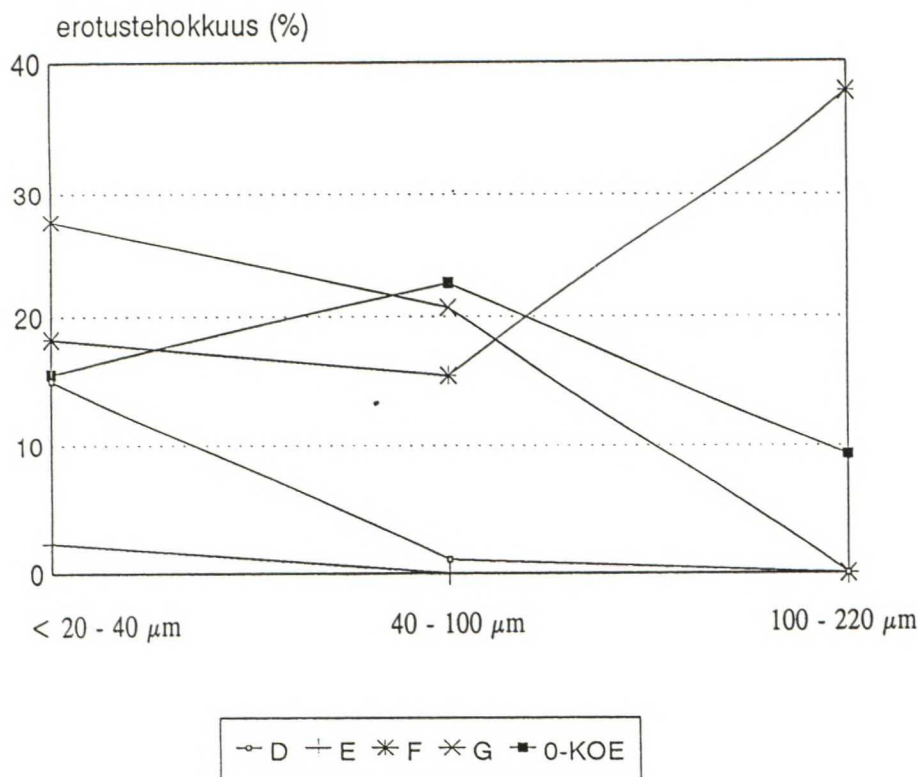
Musteenpoistolaitteiston toimintaa kuvaa ehkä parhaiten eri kokoluokkaa olevien partikkelien erotustehokkuudet. Tähän erotustehokkuuteen vaikuttavat luonnollisesti laitteiston rakenne, raaka-aine, prosessiolosuhteet sekä tietysti käytetyt vaahdotuskemikaalit.

Saadut tulokset olivat selvästi heikompia kuin esikokeiden perusteella määritetyt erotustehokkuudet (kuva 30). Tämä oli edellisessä kohdassa esitettyjen vaaleusmittausten tulosten perusteella odotettavissakin, sillä esikokeet osoittivat GSC:n poistavan parhaiten juuri kaikkein pienimpiä partikkeleita. Toisaalta halkaisijaltaan pienet (alle 40 μm) partikkelit vaikuttavat eniten massan vaaleuteen, joten varsin alhaisiksi jääneet vaaleuden nousut viittasivat myös heikkoihin erotustehokkuuksiin. Koeajon I ja nollakokeen muita huomattavasti korkeampien syöttömassojen vaaleuksien ja partikkelien kokojakaumien välillä on

välillä on myös selvä yhteys. Näiden koeajojen massoista lasketut partikkelilukumäärät olivat nimittäin muita moninkertoin alhaisempia. Kuvissa 34, 35 ja 36 on esitetty koeajoissa eri kokoisille partikkeleille saadut erotustehokkuudet.



KUVA 34. Rasvahapoilla ja nollakokeena ajetuista koeajoista saadut eri kokoisten partikkelien erotustehokkuudet.



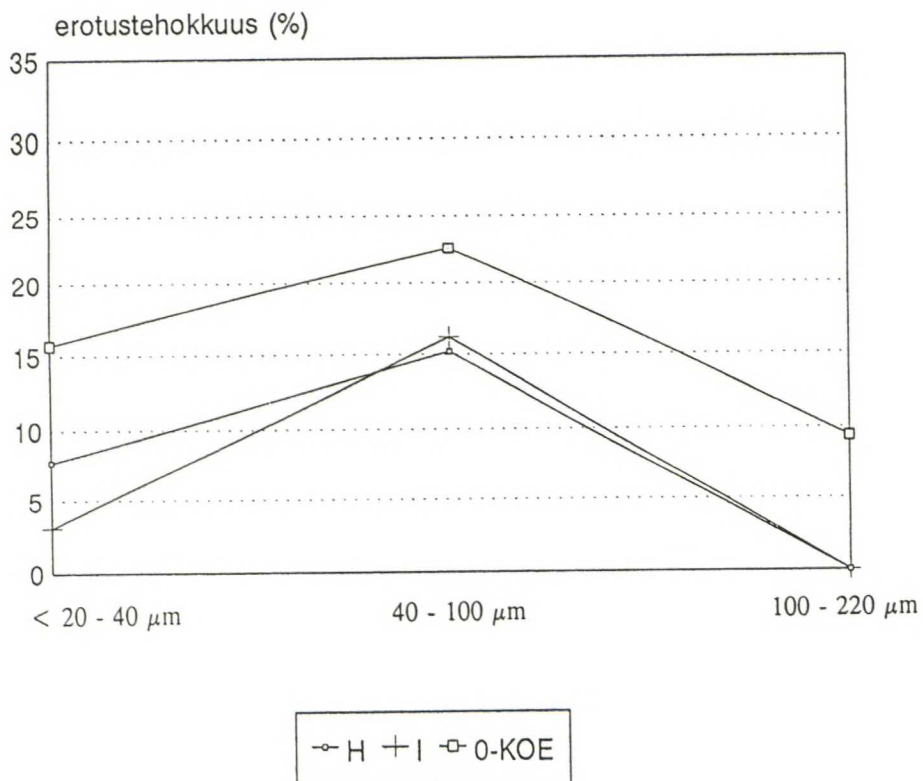
KUVA 35. Emulsioilla ja nollakokeena ajetuista koeajoista saadut eri kokoisten partikkelien erotustehokkuudet.

Tarkasteltaessa koeajoja, joissa vaaleuden muutokset olivat suurimpia, voidaan selvästi havaita erotustehokkuutta osoittavien käyrien laskevan partikkelikoon kasvaessa. Tämä vahvistaa esikokeiden perusteella tehtyä havaintoa GSC:n tehokkuudesta juuri pienten partikkelien erotuksessa. Kaiken kaikkiaan erotustehokkuudet olivat kuitenkin varsin alhaisia. Koeajoissa A:sta G:hen saatujen tulosten ja edellä esitettyjen vaaleuden muutosten välillä ei ollut selvää yhteyttä muissa kuin koeajossa G, jossa pienten partikkelien erottuminen oli selvästi tehokkaampaa kuin muissa ajoissa.

Mielenkiintoisin ilmiö havaittiin kuitenkin tarkasteltaessa nollakokeesta saatuja tuloksia. Niiden mukaan ilman vaahdotuskemikaaleja GSC:n erotustehokkuus olisi suurimmillaan kokoluokassa 40-100 μm . Eli toisin sanoen, koeajoissa vallinneissa olosuhteissa tähän kokoluokkaan kuuluneet partikkelit olisivat olleet oikean kokoisia törmätäkseen ja kiinnittyäkseen ilmakupliin. Tämä olisi tehostanut pelkän keskipakovoiman vaikutuksesta

tapahtuvaa epäpuhtauspartikkelien erottumista. Tämän kokoluokan partikkeleilla ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta massan vaaleuteen, jolloin nollakokeesta saatu vaaleuden nousu jäi alhaiseksi.

Nollakokeesta saatu erotustehokkuuden käyrän muoto voi tosin johtua myös satunnaisesta vaihtelusta aiheutuvasta virheestä. Vertailtaessa kuitenkin koeajoissa H ja I saatuja tuloksia nollakokeen vastaaviin, voidaan todeta partikkelien erotustehokkuuksista piirrettyjen kuvaajien olevan aivan samanmuotoisia kaikissa näissä kolmessa koeajossa. Kuten jo aikaisemmin todettiin, koeajoissa H ja I käytettyjen synteettisten tensidien kokoojaominaisuudet olivat erittäin heikot, joten periaatteessa voidaan sanoa näiden koeajojen olosuhteiden vastanneen siltä osin nollakokeen tilannetta.

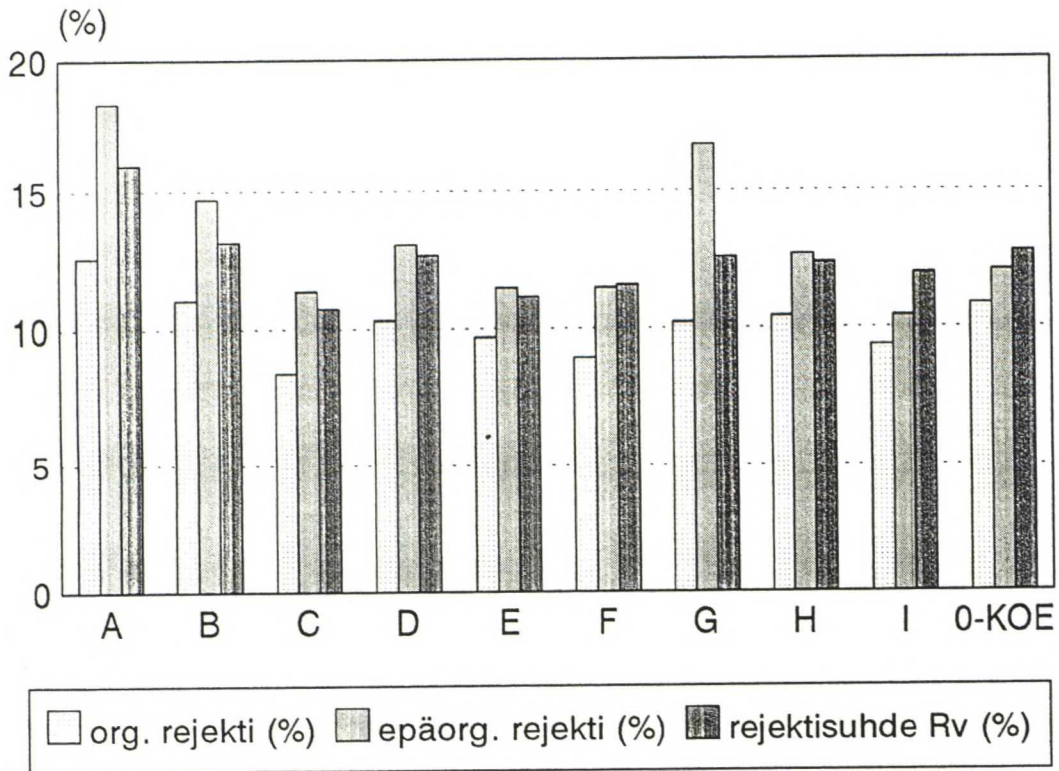


KUVA 36. Synteettisillä pinta-aktiivisilla aineilla ja nollakokeena ajetuista koeajoista saadut erikokoisten partikkelien erotustehokkuudet.

Sovellettaessa puolestaan edellä esitettyä ajatusta koeajoihin, joissa käytetyillä kemikaaleilla oli erinomaiset kokoojaominaisuudet, voidaan piirrettyjen kuvaajien perusteella tehdä erinäisiä johtopäätöksiä. Näiden tulosten perusteella halkaisijaltaan pienten (alle 40 μm) partikkelien hyvä erotustehokkuus on suurelta osin kokoojakemikaalien ansiota. Kemikaalien vaikutuksesta pienet partikkelit muodostavat suurempia agglomeraatteja (halk. 40-100 μm), jotka helpommin tarttuvat ilmakupliin ja poistuvat niiden mukana. Agglomeraattien muodostumisen myötä pienten partikkelien osuus laskee ja vastaavasti suurempien kokoluokkien lukumääräinen osuus kasvaa, joka osaltaan vaikuttaa pienimpien partikkelien parempaan erotustehokkuuteen. Näissä koeajoissa vallinnut erittäin heikko vaahtoaminen aiheutti puolestaan sen, että muodostuneita agglomeraatteja ei saatu tehokkaasti poistettua, vaan ne jäivät suurelta osin akseptijakeeseen.

13.3 Orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen rejektoituminen

Eräitä vaahdotuksen tehokkuutta kuvaavia suureita ovat myös rejektoituneen orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen määrät. Raaka-aineen sisältämä epäorgaaninen aines eli tuhka muodostuu lähinnä aikakauslehtipaperin valmistuksessa käytetyistä täyteaineista, joten eri koeajojen syöttömassojen tuhkapitoisuuksissa esiintyvät erot johtuvat juuri raaka-aineen laadun vaihteluista. Varsinkin nollakokeessa ja koeajossa I syöttötuhkan osuus on selvästi alhaisempi kuin muissa koeajoissa, joiden kesken tuhkapitoisuuksissa ei ollut merkittäviä eroavaisuuksia. Mittaustulosten perusteella laskettiin koeajoissa toteutuneet orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen rejektoitumisasteet liitteessä 10 esitettyjä kaavoja käyttäen. Lasketut tulokset on esitetty kuvassa 37.



KUVA 37. Eri koeajoissa saadut orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen rejektoitumisasteet sekä ajon aikana mitattu rejektisuhde.

Sulpun sakeuden ollessa kaikissa koeajoissa sama, on rejektoituneen orgaanisen aineen eli lähinnä kuitujen määrä ollut selvästi eniten riippuvainen ajossa vallinneesta rejektisuhdesta, eikä tutkituilla kemikaaleilla ole ollut siihen kovinkaan suurta vaikutusta. Tämä oli teoria-osassa esitettyjen kemikaalien toimintamekanismien perusteella odotettavissa, sillä kemikaalien tarkoituksenahan on lähinnä muste- ja muiden epäpuhtauspartikkelien hydrofobisten ominaisuuksien korostaminen. Tämän lisäksi GSC:ssä vallitsevat voimakkaat keskipako- ja leikkausvoimat sekä suhteellisen korkeasta sakeudesta johtuva kuitujen verkostuminen edistävät pitkien ja painavien kuitujen kulkeutumista akseptijakeeseen. Vastaavasti osa kevyemmistä partikkeleista, kuten lyhyet kuidut ja muu hienoaines, rejektoituvat samojen voimien vaikutuksesta. Näin ollen kemikaaleilla ei yleisesti ottaen ole merkittävää vaikutusta hydrofiilisten kuitujen käyttäytymiseen GSC:ssä. Tämä on todettavissa myös nollakokeessa saadusta rejektoituneen orgaanisen aineen määrästä, joka on samaa luokkaa kuin varsinaisissa koeajoissa.

Epäorgaanisen aineksen poistoon GSC:ssä vaikuttavat luonnollisesti laitteessa vallitsevat keskipakovoimat, jotka ohjaavat pienet ja kevyet täyteainepartikkelit laitteen keskelle syntyvään ilmatilaan ja sitä kautta rejektijakeeseen. Tuloksia tarkasteltaessa huomataan kuitenkin, että epäorgaanisen aineen rejektoituminen on selvästi voimakkainta koeajoissa, joissa vaaleuden nousu on ollut suurin. Voidaan siis olettaa, että muste- ja täyteainepartikkelit käyttäytyvät GSC:n olosuhteissa lähestulkoon samalla tavoin. Näin ollen tehokkaan tuhkan poiston edellytyksenä on käytetyn kemikaalin hyvien kokoojaominaisuuksien lisäksi riittävän runsaan vaahdon muodostuminen.

13.4 Tahmo-analyysi

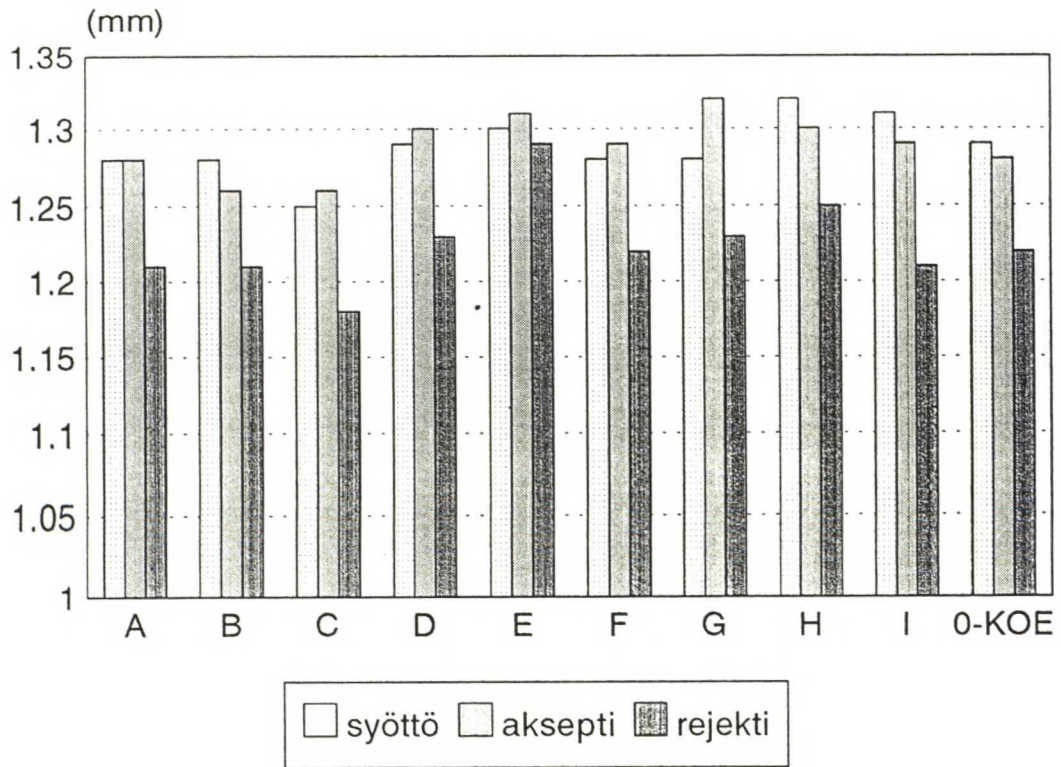
Tahmo-analyysin tulokset on esitetty liitteessä 9. Saadut tulokset osoittavat lähinnä sen, että tahmojen käyttäytymisen tutkiminen tällä menetelmällä ei ole suositeltavaa. Tulosten suuresta hajonnasta johtuen ei niiden perusteella voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Rejektijakeesta tehtyjen mittausten perusteella voidaan kuitenkin todeta GSC:n poistavan myös tahmo-aineita. Osaltaan kevyiden tahmojen erottumiseen ovat kuitenkin syynä GSC:n keskipakovoimat, eikä tutkittujen kemikaalien vaikutusta tähän erotustehokkuuteen näiden mittausten perusteella voi edes arvioida.

Sytä tulosten suureen hajontaan on useita. Ensinnäkin käytetyn raaka-aineen tahmopitoisuus ei ollut kovin suuri, jolloin otetussa näytteessä ei edes voinut olla montaa tahmopartikkelia. Tämän johdosta lasketut määrät jäivät pieniksi, joka heikentää tulosten luotettavuutta entisestään. Tahmot eivät myöskään ole tasaisesti jakautuneet sulppuun, vaan niiden esiintymistiheys vaihtelee. Tällöin määrittämisessä saatu arvo on täysin riippuvainen siitä mistä kohdasta näyte on satuttu ottamaan.

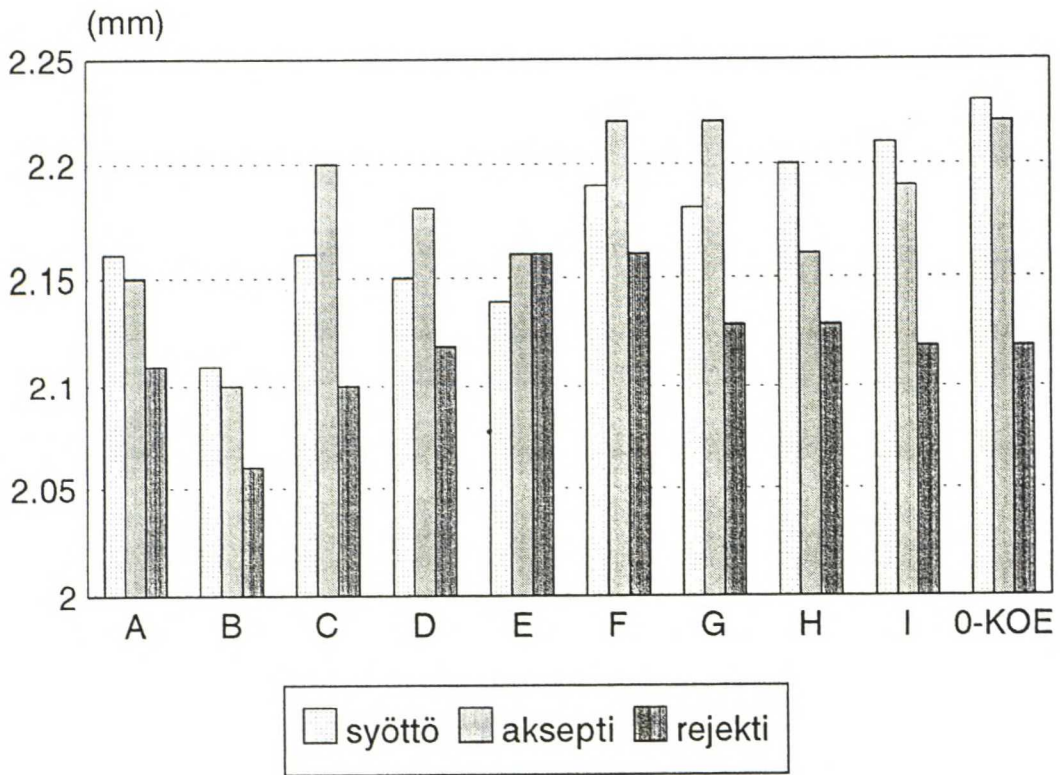
13.5 Kuidunpituusjakauma ja Canadian-Freeness-luku

Suoritetut kuidunpituusmittaukset tukevat kohdassa 13.3 esitettyä oletusta, ettei vaahdotus-kemikaaleilla ole merkittävää vaikutusta kuitujen käyttäytymiseen GSC:ssä, sillä erot eri jakeiden välillä ovat jokaisessa koeajossa lähes samaa luokkaa kemikaalista riippumatta. Tasoerot eri koeajojen välillä johtuvat puolestaan käytetyssä raaka-aineessa esiintyneistä

vaihteluista, jotka ovat syntyneet jo paperin valmistuksen yhteydessä. Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 38 ja 39.



KUVA 38. Eri koeajojen syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä mitatut pituudella painotetut kuidun keskipituudet.

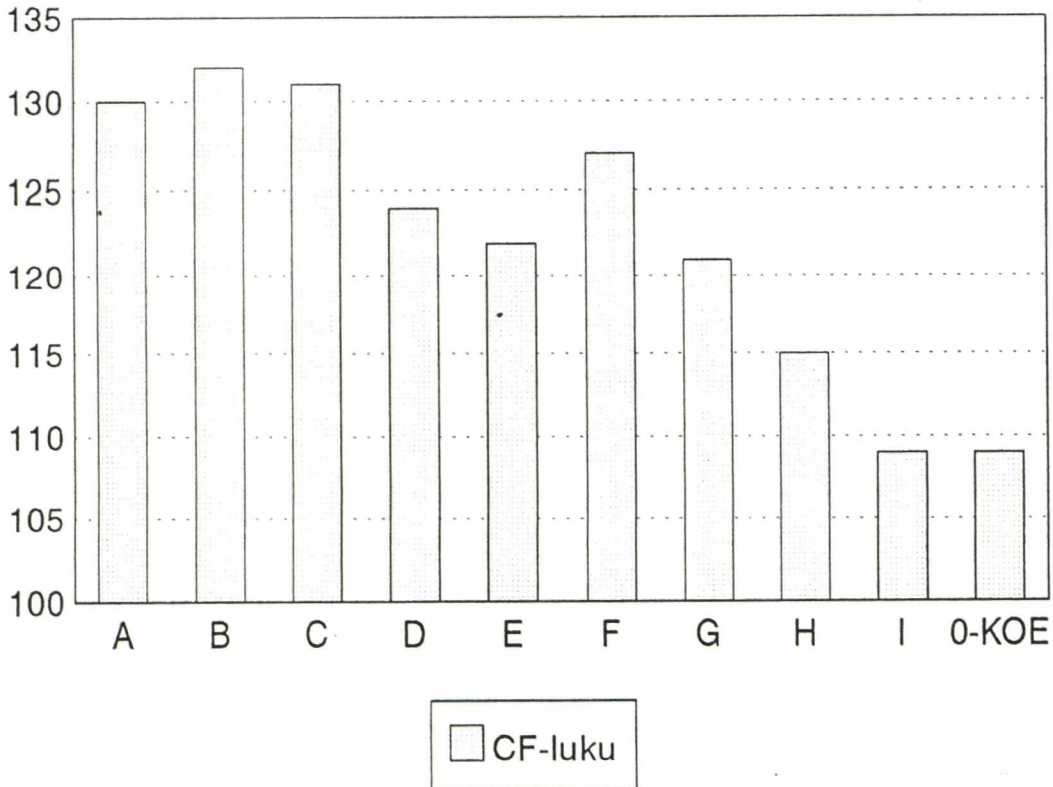


KUVA 39. Eri koe-ajojen syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä mitatut painolla painotetut kuidun keskipituudet.

Kuvaajien perusteella ei eri koeajojen kesken kaikenkaikkiaan ole suuria eroja kuitujen käyttäytymisen suhteen. Samoin oheisista kuvaajista on selvästi havaittavissa, että GSC:llä rejektoitunut kuituaines koostuu lähinnä lyhyistä ja samalla kevyistä kuiduista. Tähän ovat syynä GSC:ssä vallitsevat keskipakovoimat, joiden vaikutuksesta syöttövirtauksen mukana tulevista kuiduista pidemmät ja raskaammat painautuvat laitteen ulkokehälle ja joutuvat sitä kautta akseptijakeeseen. Kevyt kuitumateriaali pysyy lähempänä pyörteen keskustaa ja rejektoituu siten huomattavasti helpommin.

Tarkempi tulosten tarkastelu osoittaa kuitenkin, että koeajojen kesken on kuitujen pituusjakaumissa havaittavissa jonkinasteisia eroavaisuuksia. Liitteessä 9 esitettyjen kumulatiivisten kuidunpituusjakaumien mukaan ajojen A, B ja C akseptijakeet sisältävät muihin ajoihin verrattuna huomattavasti enemmän aivan lyhyitä kuituja. Sama ilmiö on

havaittavissa myös koeajon F kohdalla. Nämä tulokset ovat kuitenkin selvässä ristiriidassa mitattujen Canadian-Freeness-lukujen kanssa, jotka on esitetty kuvassa 40.



KUVA 40. Eri koeajojen akseptinäytteistä mitatut Canadian-Freeness-luvut.

CF-luku on kääntäen verrannollinen massan suotautumisvastukseen eli se muodostuu sitä pienemmäksi mitä nopeammin massan suotautuminen hidastuu. Massan ollessa pitkäkuituista on suotautuminen nopeampaa. Suotautumistapahtuman aikana pitkät kuidut asettuvat viiralle lomittain muodostaen suhteellisen löyhän verkoston, jonka läpi sulpun sisältämä vesi virtaa helposti eli suotautumisvastus on pieni. Massan hienoainesspitoisuuden kasvaessa kasvaa myös suotautumisvastus, sillä hienoaines tukkii kuitujen muodostamaan verkostoon jääneet virtauskanavat. Muodostuva massakakku on siis tiiviimpi ja veden poistuminen sen läpi vaikeutuu.

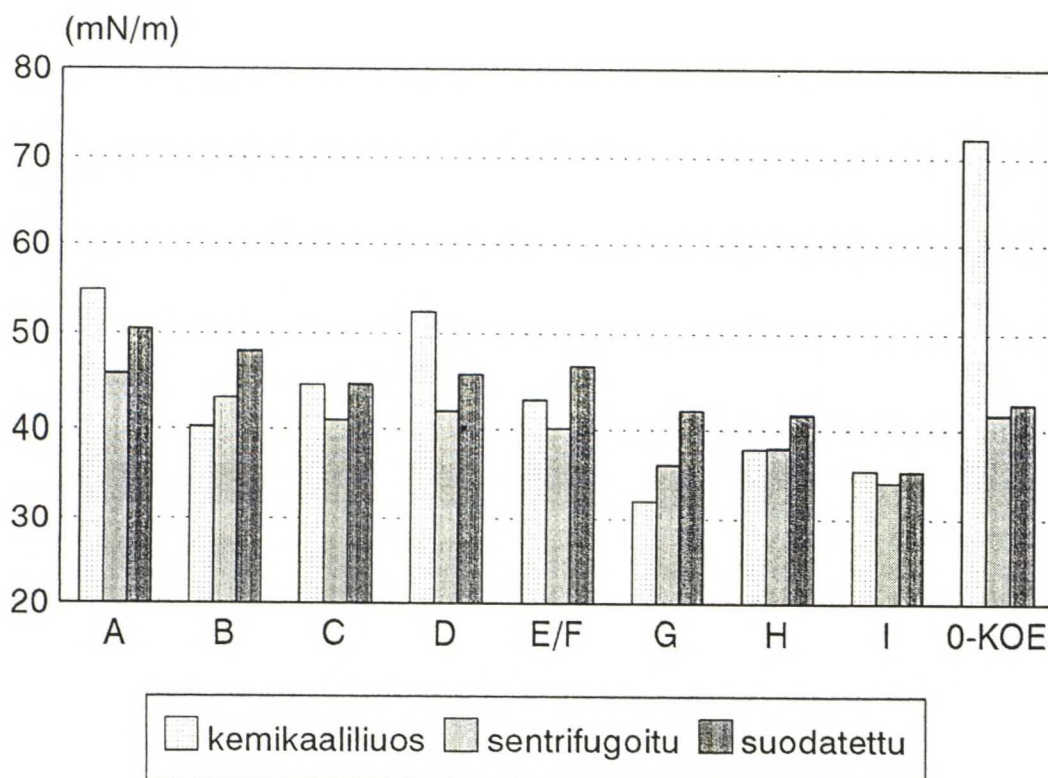
Edellisen perusteella olisi siis ollut odotettavaa, että koeajojen A, B, C ja F akseptijakeiden CF-luvut olisivat olleet muita pienempiä. Näin ei kuitenkaan käynyt, vaan tilanne oli aivan päinvastainen. Koska tulokset ovat aivan systemaattisia, ei voida myöskään puhua

satunnaisesta vaihtelusta, vaan saaduilla tuloksilla täytyy olla jokin yhteinen tekijä. Kaikissa mainituissa ajoissa ainakin osa rasvahappopohjaisesta vaahdotuskemikaalista lisättiin juuri ennen GSC:tä, kun muissa kemikaalin annostus tapahtui jo pulpperissa. Näin ollen on mahdollista, että syöttövirtaukseen lisätty rasvahappo johtaa täyteainepartikkelien tehokkaaseen flokkautumiseen. Toisaalta on mahdollista, että tämä flokkautuminen tapahtuu vasta vaahdotuksen jälkeen. On nimittäin epätodennäköistä, että suuret täyteaineflokkit kestäisivät ehjinä GSC:n läpi kulkiessaan.

Suuret täyteaineflokkit lasketaan kuidunpituusmittauksissa lyhyiksi kuiduiksi lisäten siten lyhyen kuidun osuutta kumulatiivisessa jakaumassa. Freeness-mittauksissa flokkautuneet täyteaineet eivät vaikuta massan suotautumiseen ja CF-luku muodostuu näissä koeajoissa korkeaksi. Muiden koeajojen alhaiset CF-luvut selittyvät irrallisilla täyteainepartikkeleilla, jotka ovat niin pieniä, etteivät ne näy kuidunpituusmittauksissa, mutta lisäävät massan suotautumisvastusta CF-lukua mitattaessa.

14. LIUOSTEN PINTAJÄNNITYKSET

Vesiliuokseen lisätyn pinta-aktiivisen aineen molekyyliden lisätessä systeemin vapaata energiaa, tensidien molekyylit orientoituvat ilma-vesi-rajapinnoille alentaen liuoksen pintajännitystä. Pintajännityksen aleneminen puolestaan vaikuttaa liuoksen vaahtoamiseen ja muodostuneen vaahdon stabiliteettiin. Näin ollen pintajännitysmittausten perusteella voitiin tehdä suuntaa antavia vertailuja eri kemikaalien vaahtoamistaipumuksista. Mittausten tulokset on esitetty kuvassa 41.



KUVA 41. Eri koeajoissa käytettyjen pinta-aktiivisten aineiden liuoksista ja massasuodoksista mitatut pintajännitykset.

Tarkasteltaessa kirkkaiden kemikaaliliuosten pintajännityksiä voidaan selvästi erottaa puhtaat rasvahapot omaksi ryhmäkseen. Rasvahappoliuosten pintajännitykset olivat selvästi korkeampia kuin synteettisiä pinta-aktiivisia aineita sisältävien liuosten, johtuen ko. aineiden erilaisista molekyylirakenteista.

Vertailtaessa kemikaaliliuoksista mitattuja pintajännityksiä ajojen aikaisiin silmämääräisiin havaintoihin, voidaan todeta koeajossa G käytetyllä kemikaalilla saadun kaikkein selvimmän yhteyden runsaan vaahtoamisen ja alhaisen pintajännityksen välillä. Toisaalta pintajännitys on voimakkaasti riippuvainen pinta-aktiivisen aineen konsentraatiosta, jos tämä on alle cmc:n. Tästä syystä on vaikea löytää selvää korrelaatiota pintajännityksen ja vaahtonmuodostuskyvyn välillä, jolloi pintajännitystä mitata konsentraation funktiona.

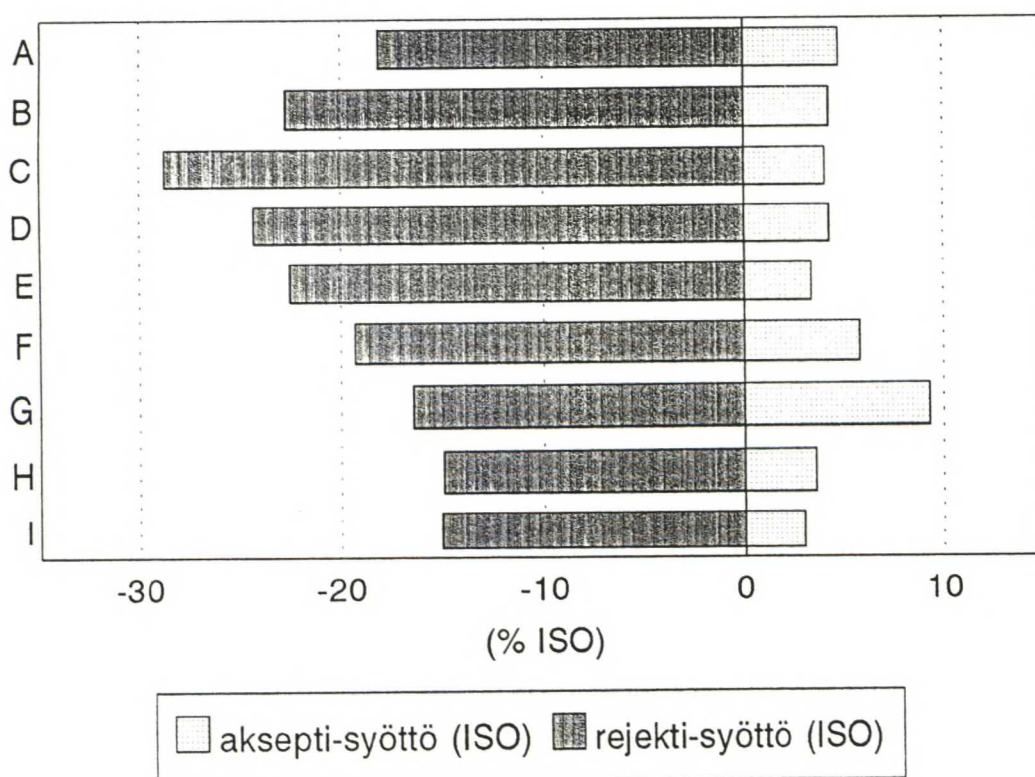
Siistauksen aikaiseen vaahtoamiseen ja muodostuneen vaahdon stabiliteettiin vaikuttavat kuitenkin myös sulpussa oleva hienoaines ja kolloidaaliset partikkelit. Esimerkiksi kalsiumsaippua-systeemeistä tiedetään, että partikkelien flotatoitumisen kannalta tärkeät kalsiumsaippuat ovat myös tehokkaita vaahdontappajia. Onkin olemassa viitteitä siitä, että näissä systeemeissä vaahto olisikin pienten partikkelien stabiloima. Teorian mukaan stabilisaattoreina toimisivat lähinnä mineraaliset täyteaineet ja päällystyspigmentit sekä mahdollisesti myös painovärijäämiä sisältävät kuidut /44/. Näin ollen voidaan hyvin olettaa kolloidaalisten partikkelien vaikuttavan samalla tavoin vaahdon stabiliteettiin kaikissa vaahdotussysteemeisissä.

Pintajännittysmittaukset tehtiin myös kemikaalien kanssa sekoitettujen massojen suodoksis-ta. Tällä mittauksella pyrittiin selvittämään pinta-aktiivisten aineiden ja kuitujen välisen vuorovaikutuksen merkitystä liuosten pintajännityksiin. Alunperin mittauksen tarkoituksena oli selvittää kuituihin tapahtuvan pinta-aktiivisen aineen adsorption vaikutusta suodoksen pintajännitykseen, mutta saatujen tulosten perusteella tästä ei kuitenkaan voida tehdä selviä johtopäätöksiä. Sen sijaan vertailtaessa sentrifugoinnin jälkeen saatuja mittaustuloksia suodatuksen jälkeisiin on selvää, että massasulpun mukana tulevalla hienoaineksella on merkittävä vaikutus pintajännitysmittauksissa saatuihin arvoihin.

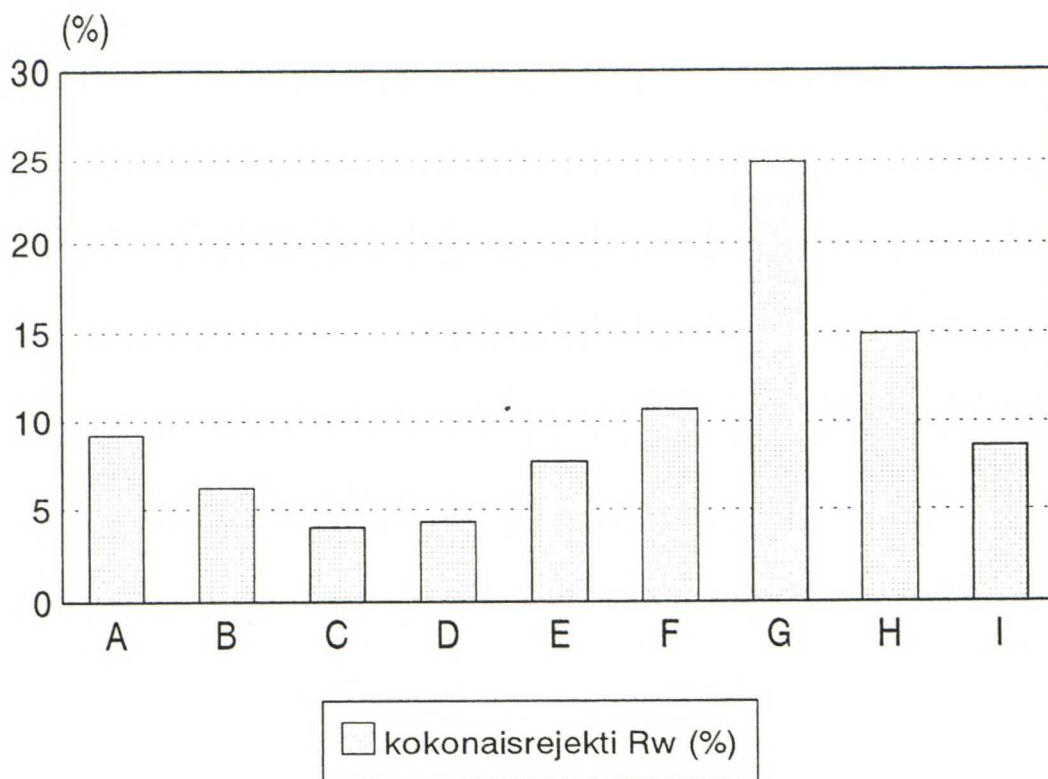
Erityisen hyvin massan mukana tulevien aineiden ja hiukkasten vaikutus tulee esiin nollakokeena tehdyssä mittauksessa, jossa sentrifugoituun ja suodatettuun massasulppuun ei lisätty pinta-aktiivisia aineita. Siitä huolimatta suodoksesta mitattu pintajännitys on aivan samaa luokkaa kuin eräissä koeajoissa. Nollakokeen suodoksen alhaisen pintajännityksen aiheuttaa paperiraaka-aineen mukana tulevan alhaisen tensidipitoisuuden ohella kolloidaalinen materiaali, jota ei kokoojakemikaalin puuttuessa saatu poistettua sentrifugoimalla tai suodattamalla. Sama ilmiöhän havaittiin jo akseptisuodoksen likaisuusmittausten yhteydes-sä. Todennäköisesti samasta syystä koeajoissa H ja I mitattu suodatetun näytteen pintajän-nitys on alhaisempi kuin ajossa G, jonka pintajännitys puhtailla kemikaaliliuoksilla oli huomattavasti edellisiä alhaisempi.

15. LABORATORIOVAAHDOTUS OUTOKUMPU-KENNOLLA

Outokummun laboratorioskennolla, joka edusti vertailupistettä perinteiseen vaahdotuskennoon nähden, saadut tulokset ovat selvästi parempia kuin varsinaisissa koeajoissa GSC-hydrosyklonalla. Laboratoriovaahdotuksissa vallinneet olosuhteet ja saadut tulokset on esitetty liitteessä 9. Outokummun kennolla saavutettuihin hyviin tuloksiin on vaikuttanut todennäköisesti laboratorioskennon huomattavasti rauhallisemmat olosuhteet sekä vaahdotukseen käytetyn ajan pituus, joka oli moninkertainen GSC:hen verrattuna. Tämän lisäksi kemikaalitoimittajien suositukset koeajoissa käytettävistä kemikaaleista ja niiden annoksista perustuivat juuri heidän tietoihinsa perinteisestä flotaatiosta. Kuvissa 42 ja 43 on esitetty laboratoriovaahdotuksissa saadut vaaleuden nousut ja rejektin määrät.



KUVA 42. Eri koeajojen rinnakkaismäärittämisinä suoritetuista laboratoriovaahdotuksista saadut vaaleuden nousut.



KUVA 43. Eri koeajojen rinnakkaismäärittämisinä suoritetuista laboratoriovaahdotuksista saadut rejektin määrät.

Myöskin Outokummun laboratorioskennolla eri kovetusasteiset rasvahapot käyttäytyivät päinvastoin kuin työn kirjallisuusosassa esitetty teoria antoi odottaa. Teorian mukaanhan pitkälle kovetetun rasvahapon tulisi olla heikosti vaahtoava tuote, joka antaa pienen rejektimäärän. Näissä koeajoissa tilanne oli kuitenkin aivan päinvastainen, sillä eri kovetusasteiset rasvahapot käyttäytyivät systemaattisesti teorian vastaisesti.

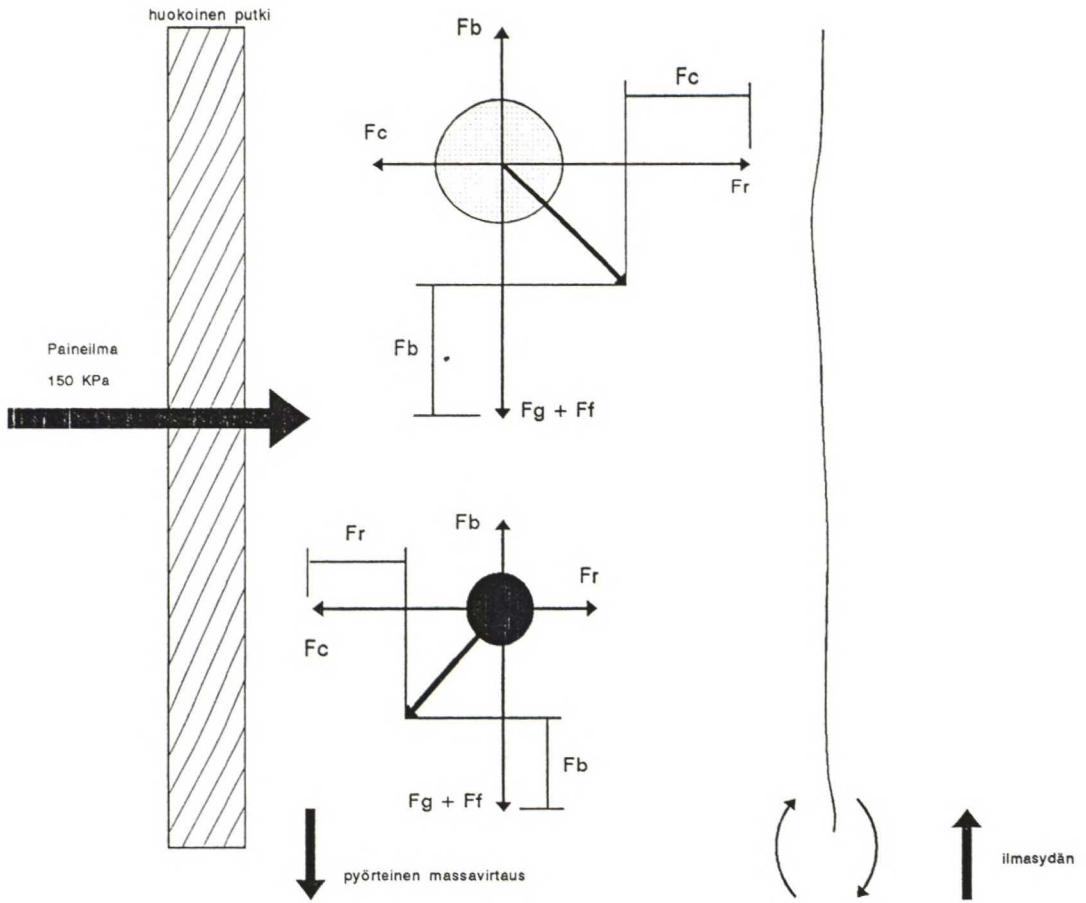
Koeajojen E ja F tulosten vertailu tukee jo GSC:n tuloksien perusteella tehtyä oletusta vaahdotuskemikaalin annostuksen jakamisen hyödyllisyydestä. Juuri ennen vaahdotuskennoa suoritettu tuoreen kemikaalin lisäys paransi vaahdotuksen tehokkuutta merkittävästi. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että suuri osa pulppiin lisätystä kemikaalista ehtii reagoida sulpussa olevien kuitujen ja partikkelien kanssa adsorboituen niiden pintoihin. Tämän johdosta vaahdotuksen aikana kemikaalin stabiloimaan vaahdonmuodostukseen on käytettävissä itse asiassa huomattavasti vähemmän pinta-aktiivista ainetta kuin pulppiin

kennoa on sitoutumiseen käytettävissä oleva aika huomattavasti lyhyempi ja vaahdon stabi-lointimekanismi toimii tehokkaammin. Tämä ilmiö korostuu varsinkin kyseisten koeajojen kohdalla, joissa näytteenoton ja Outokumpu-vaahdotuksen välinen aika oli olosuhteiden pakosta useita tunteja.

Mielenkiintoisin piirre näissä laboratoriovaahdotuksissa oli kemikaalin vaahtoamisen ja rejektin määrän välinen yhteys. Kemikaalin stabiloiman vaahdonmuodostuksen lisääntymisen johti poikkeuksetta myös runsaampaan rejektoituneen aineen määrään. Suurempi rejektin osuus merkitsi luonnollisesti myös korkeampaa vaaleuden nousua, mutta samalla kuitutappiot kasvoivat moninkertaisiksi. Erityisesti tämä ilmiö oli havaittavissa koeajossa G, jossa käytetty kemikaali oli kokeilluista runsaimmin vaahtoavaa. Tilanne on sikäli mielenkiintoinen, että GSC:n olosuhteissa kemikaalin runsas vaahtoaminen ei lisää rejektoituneen kuitumateriaalin määrää, koska rejektisuhdetta pystytään säätämään kemikaalin vaahtoamisen mukaan. Toisin sanoen rejektoituneen materiaalin määrä kyetään pitämään vakiona.

16. GSC:N TOIMINNAN MALLINTAMINEN

GSC on toimintaperiaatteeltaan verrattavissa käänteiseen pyörrepuhdistukseen, sillä molemmissa kevyiden epäpuhtauksien erottuminen massasta perustuu samoihin vaikuttaviin voimiin. Tarkasteltaessa pelkästään pyörteisestä virtauksesta aiheutuvia voimia sykloonan sisällä olevaan hiukkaseen, todetaan siihen vaikuttavan mm. keskipakovoiman, nosteen, gravitaatiovoiman ja radiaalisen syrjäytysvoiman. GSC:ssä näiden voimien lisäksi kevyiden epäpuhtauspartikkelien erottumista tehostaa huokoisen putken läpi virtaavasta ilmasta aiheutuva radiaalisen voiman kasvu. Kuvassa 44 on havainnollistettu GSC:n sisällä ilmakupliin ja partikkeleihin vaikuttavia voimia.



KUVA 44. GSC-hydrosyklonin sisällä ilmakupliin ja ominaispainoltaan raskaisiin partikkeleihin vaikuttavat voimat, eli F_b ...nostevoima, F_c ...keskipakovoima, F_r ...radiaalinen voima, F_g ...painovoima ja F_f ...massan virtauksesta aiheutuva voima.

Syklonin sisällä virtauksen tangentialinopeuskomponentti aiheuttaa keskipakovoiman, joka on merkittävin tekijä kuitujen ja epäpuhtauspartikkelien erottumisessa. Partikkelin tangentialinopeus ja siitä aiheutuva keskipakovoima on laskettavissa yhtälöistä 18 ja 19 /75/:

$$v_t = \frac{k}{r^n} \quad (18)$$

$$F_k = \frac{\pi \times d^3 \times \rho' \times v_t^2}{6 \times r} \quad (19)$$

joissa	v_t	on tangentiaalinopeus
	k	vakio
	r	partikkelin pyörimissäde
	n	kokemusperäinen eksponentti ($0,5 < n < 0,9$)
	F_k	on keskipakovoima
	d	partikkelin halkaisija
	ρ'	partikkelin tiheys

Sulpuissa olevat partikkelit kulkeutuvat eri suuntiin riippuen niihin vaikuttavien voimien suuruuksista. Hiukkaset pyrkivät tiheydensä, kokonsa ja muotonsa mukaan tasapainotilaan edellä mainittujen voimien suhteen ja jakautuvat tämän tilan mukaiselle etäisyydelle pyörteen keskiöstä. Yhtälöiden 19 ja 20 perusteella keskipakovoiman vaikutus on sitä suurempi mitä painavampi partikkeli on. Näin ollen suuren tiheyden omaaviin partikkeleihin, kuten kuituihin, on keskipakovoiman merkitys suurempi kuin muiden voimien yhteisvaikutus. Tämän johdosta kuidut painautuvat syklonin ulkokehälle ja akseptoituvat. Vastaavasti ominaispainoltaan alhaisempien epäpuhtauspartikkelien ja ilmakuplien kohdalla radiaaliset syrjäysvoimat muodostuvat suuremmiksi kuin keskipako- ja muiden voimien yhteenlaskettu vaikutus. Tällaiset partikkelit kulkeutuvat lähemmäs pyörteen keskustaa ja sitä kautta rejektijakeeseen /76/.

Massan sakeuden kasvaessa kuitujen välinen keskimääräinen etäisyys pienenee ja tästä johtuen kuitujen keskinäinen sekä kuitujen ja pienten partikkelien väliset vuorovaikutukset lisääntyvät. Toisin sanoen korkeassa sakeudessa tapahtuvassa pyörteisessä virtauksessa

kuidut vastustavat epäpuhtauspartikkelien siirtymistä kuitukerroksen läpi huomattavasti enemmän kuin alhaisemmissa sakeuksissa. Tämä ilmiö havaittiin vakiosyöttövirtauksella tehdyissä esikokeissa vertailtaessa GSC:n musteenpoistotehokkuuksia eri syöttösakeuksissa (11.1.1 Massavirtaus ja syöttösakeus). Sakeuden nousun myötä tihentynyt kuituverkosto esti mustepartikkelien tehokkaan siirtymisen massapyörteen sisäkehälle, jolloin suuri osa musteesta jäi vielä akseptijakeeseen.

Syklonin läpi virtaavan massasulpun tilavuusvirtaan eli kapasiteettiin voidaan vaikuttaa syötön ja akseptin välistä paine-eroa muuttamalla. Kapasiteetin nosto kasvattaa massan sisääntulonopeutta ja samalla kasvaa syklonin sisälle muodostuvan tangentiaalivirtauksen aiheuttama keskipakokenttä. Keskipakokentän kasvu vaikuttaa eri ominaispainoisten partikkelien erottumisen tehostumiseen, joten todennäköisesti korotetun syöttösakeuden myötä heikentynyttä erotustehokkuutta voitaisiin parantaa nostamalla GSC:n syöttövirtausta eli massan syöttöpainetta lisäämällä.

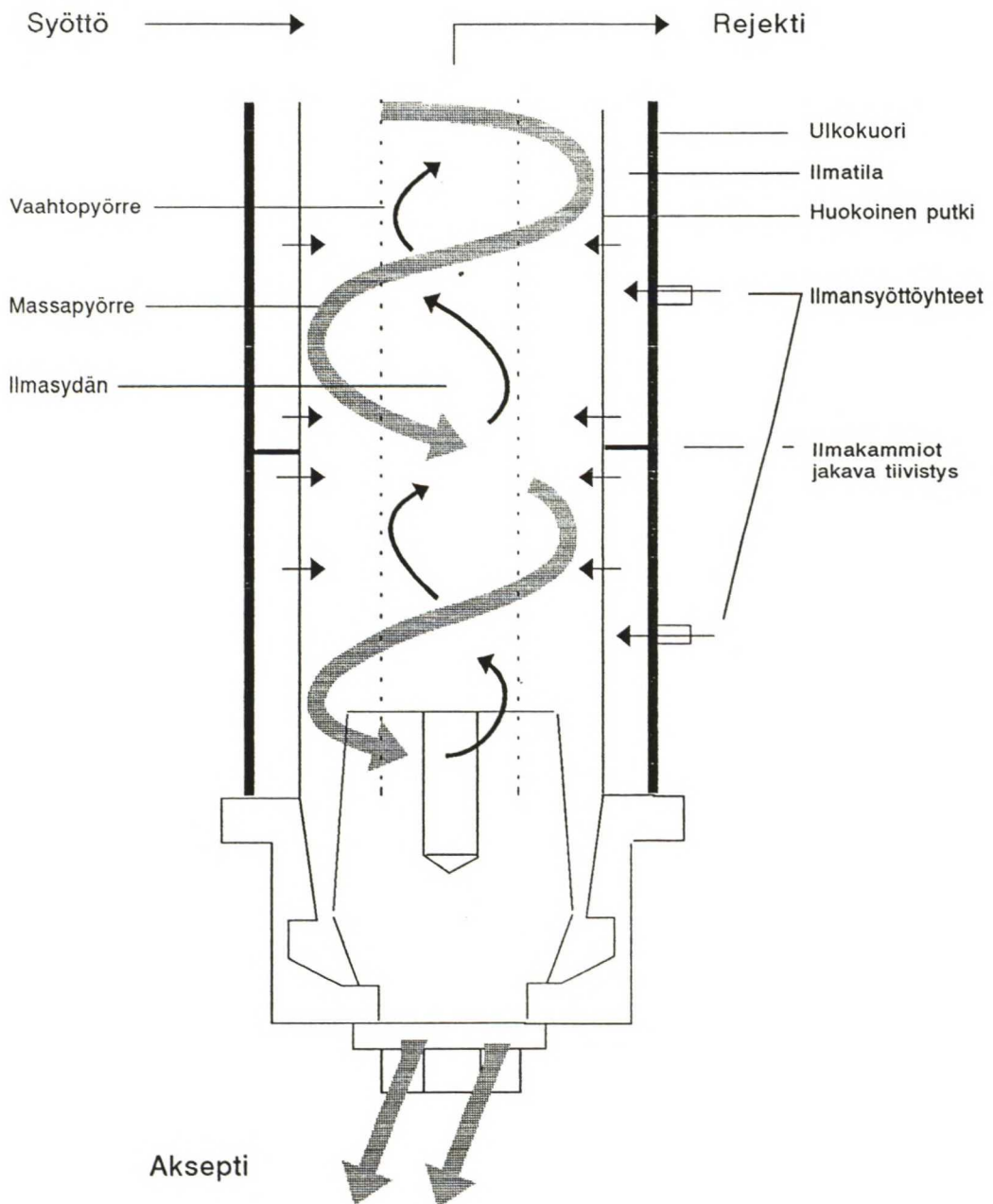
Kuten edellä mainittiin GSC:n olosuhteissa partikkelien erottumiseen vaikuttaa myös radiaalisessa suunnassa massapyörteeseen syötetty ilmavirtaus. Ilman virratessa huokoisen putken läpi muodostuneet ilmakuplat sekoittuvat samantien ohi virtaavaan massaan. Massapyörteen mukana virratessaan ne joutuvat välittömästi laitteessa vallitsevan keskipakovoimakentän vaikutuksen alaisiksi. Ilmakuplan alhaisesta ominaispainosta johtuen ne kulkeutuvat spiraalin muotoista rataa massavirran läpi kohti laitteen keskustaa.

Massavirran läpi kulkiessaan ilmakuplat keräävät mukaansa massan joukossa olevia epäpuhtauspartikkeleita. On kuitenkin todennäköistä, että nopeasta virtauksesta aiheutuvat leikkausvoimat repivät hajalle näitä ilmakupla-partikkelisysteemejä ennenkuin ne ehtivät massapyörteen läpi. Näin ollen yhden epäpuhtauspartikkelin kuljettamiseen massapyörteen ulkokehältä syklonin keskustaan saattaa osallistua useitakin ilmakuplia. On kuitenkin selvää, että ilmakuplien tunkeutuminen massakerroksen läpi tehostaa keskipakovoiman johdosta tapahtuvaa epäpuhtauspartikkelien erottumista. Tätä erottumista voidaan edelleen tehostaa oikealla siistauskemialla. Koeajojen perusteella todettiin GSC:n toimivan parhaiten käytetyn kemikaalin muodostaman ja stabiloiman vaahdon ollessa erittäin

runsasta. Tällöin todennäköisyys epäpuhtauspartikkelien ja ilmakuplien törmäämiselle kasvaa ja partikkelien kulkeutuminen massavirran läpi on vieläkin tehokkaampaa.

Syklonin pyörteen keskelle muodostuu keskipakovoiman vaikutuksesta massasuspensiosta erkaantuneesta ilmasta ns. ilmasydän, jossa vallitsee huomattava alipaine. Tämän ilmasydämen ja massapyörteen välisessä alueessa tapahtuu rejektoitavan materiaalin virtaaminen ylös kohti rejektiyhdettä. Yleisen käsityksen mukaan tämä ylöspäin suuntautuva virtaus tapahtuu massavirran vastaisena pyörteenä ilmasydämen ympärillä /77/. Kun kyseessä on runsaasti vaahtoava kemikaali, voidaan olettaa tämän ylöspäin suuntautuneen pyörteen olevan suurimmaksi osaksi kemikaalin stabiloimaa vaahtoa ja siihen tarttuneita epäpuhtauspartikkeleita. Saman aikaisesti vaahtopyörteen virratessa massapyörrettä vasten ylös, kuljettavat ilmakuplat keskipakovoiman vaikutuksesta uusia epäpuhtauspartikkeleita massapyörteen sisäkehälle, josta ne edelleen tarttuvat rejektipyörteessä oleviin kupliin ja rejektoituvat niiden mukana. Kuvassa 45 on esitetty periaatteellinen kaavio GSC:ssä tapahtuvista virtauksista.

Vaahdotuskemikaalin stabiloiman vaahdonmuodostuksen lisääntyessä ilmasydämen ympärille muodostuvaan pyörteeseen kertyy yhä enemmän vaahtoa ja sen mukana kuplien seinämissä massasuspensiosta eronnutta vettä. Todennäköisesti myös vaahdotuksen epäselektiivisyys lisääntyy ja rejektijakeeseen ohjautuvan kuitumateriaalin määrä kasvaa. Tämän seurauksena nousee runsaan vaahtoamisen myötä myös syklonin rejektisuhde, joka voidaan korjata kääntämällä säätöosaa alaspäin eli suurentamalla akseptiyhteen aukkoa. Tämä yksinkertainen rejektisuhteen säätömahdollisuus yhdessä keskipakovoimakentän kanssa mahdollistaa runsaasti vaahtoavien kemikaalien käytön GSC:ssä.



KUVA 45. GSC:n poikkileikkaus ja laitteen sisällä esiintyvät virtaukset.

17. JATKOTOIMENPITEITÄ

Tärkeimpänä ja kiireellisimpänä jatkotoimenpiteenä on selvittää syitä siihen, miksi esikokeissa saatiin huomattavasti parempia tuloksia kuin varsinaisissa koeajoissa. Eräänä merkittävänä tekijänä voidaan pitää käytettyjen GSC-hydrosyklonien rakenteellisten eroavaisuuksien vaikutusta niiden erotustehokkuuteen. Toisin sanoen näitä kahta laitetta tulee vertailla keskenään ja sitä kautta yrittää löytää syitä tulosten suureen hajontaan. Tämän suuntaisissa koeajoissa tulee, tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi, kokeet molemmilla laitteilla suorittaa samaa massaa käyttäen. Tämä saadaan parhaiten järjestettyä siten, että koeajoissa käytettävä massa noudetaan Keräyskuitu Oy:ltä. Samanaikaisesti otetaan vertailunäytteet Outokumpu-kennoilta, jolloin voidaan vertailla GSC:n toimintaa myös perinteiseen vaahdotukseen. Koeajo GSC-syklonien vertailemiseksi on parasta ajaa FFRC:n koehallissa, jossa varmemmin saadaan molemmille laitteille samankaltaiset ajo-olosuhteet. Tämän suuntaiset lisäkokeet ehdittiinkin ajaa ennen työn valmistumista ja saadut tulokset on esitetty liitteessä 11.

Edellä esitetyn GSC:n toimintaperiaatteen myötä tuli esiin ajatus, että näissä koeajoissa käytettyjen ajoparametrien lisäksi saattaisi löytyä toinenkin optimaalinen piste korkeamassa sakeudessa ja suuremmalla syöttövirtauksella. Tämän mahdollisen pisteen löytämiseksi kannattaisi koeajoja jatkaa. Kyseisiä parametreja ei kuitenkaan laiteteknisistä syistä voida nostaa rajattomasti. Todennäköistä onkin, että laitteen pituutta tulee lisätä kapasiteetin kasvaessa, jolloin keskipakovoimakenttä vaikuttaa partikkeleihin pidemmän aikaa ja erottuminen on tehokkaampaa.

Ilman jaon muuttamisen vaikutusta GSC:n toimintaan tulee kokeilla. Mikäli kohdassa 16. (GSC:n toimintaperiaate) esitetty teoria ilmakuplan kulkeutumisesta massapyörteen läpi spiraalin muotoista rataa pitkin pitää paikkansa, on syklonin alaosaan turha syöttää ylimääräistä ilmaa. Se lisää ainoastaan akseptimassan ilmapitoisuutta. Näin ollen syklonin alimmaiseen kolmannekseen syötetyn ilman määrää voitaisiin vähentää sen vaikuttamatta GSC:n erotustehokkuuteen.

Optimaalisen kemikaaliyhdistelmän löytämiseksi tulee koeajoja jatkaa. Erityisesti hyvät dispergointiominaisuudet omaavien emulsioiden ja voimakkaiden rasvahappokokoojien yhdistelmät tulisi kartoittaa. Olisi syytä kokeilla myös erilaisten emulsioannosten vaikutusta optimaalisen vaahtoamisen selvittämiseksi. Teollisten sovellutusten vaatimat yhdistelmät ovat kuitenkin todennäköisesti pitkälti prosessikohtaisia, mutta laboratoriomittakaavassa tulee ensin selvittää parhaiten yhteensopivia kemikaalityyppejä ja niiden annostelupaikkoja.

Edellisten lisäksi on myös hyvä selvittää millaisia vaikutuksia käytetyillä kemikaaleilla on muihin prosessin vaiheisiin ja kuinka näitä mahdollisesti haitallisia vaikutuksia pystyttäisiin eliminoidaan. Tämä tulee kysymykseen erityisesti käytettäessä voimakkaasti vaahtoavia kemikaaleja, joiden rikastuminen kiertovesiin saattaa aiheuttaa yllättäviä ongelmia.

18. YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena ei ollut kokeissa käytettyjen kemikaalien asettaminen tiettyyn paremmuusjärjestykseen, vaan lähinnä tutkia eri kemikaalien erilaisia vaikutusmekanismeja ja vertailla niiden soveltuvuutta GSC-hydrosykloniin. Vaikka koeajoissa saadut tulokset jäivätkin huomattavasti esikokeiden vastaavia heikommiksi, saatiin niiden perusteella kuitenkin arvokasta tietoa GSC:n toiminnasta ja sen vaatimista olosuhteista. Tämän lisäksi pystytään nyt helposti osoittamaan mihin suuntaan mahdollisia jatkotutkimuksia on syytä kohdistaa.

Kirjallisuudessa perehdyttiin perinteiseen siistausprosessiin ja siinä vaikuttavaan kemiaan. Suurinta huomiota kiinnitettiin kuitenkin lähinnä pulpperoinnissa ja vaahdotuksessa käytettyjen pinta-aktiivisten aineiden ja näissä prosessinvaiheissa esiintyvien pintakemiallisten ilmiöiden tarkasteluun.

Kokeellisessa osassa selvitettiin koeajojen perusteella mitä ominaisuuksia vaahdotuskemikaaleilta vaaditaan GSC-hydrosyklonin olosuhteissa. Saatujen mittaustulosten perusteella pystyttiin myös luomaan teoria GSC:n sisäisistä virtauksista ja siinä vaikuttavista voimista.

Tutkitut kemikaalit poikkesivat toisistaan huomattavasti varsinkin kokoojaominaisuuksiltaan. Tämä oli selvästi havaittavissa erityisesti akseptisuodosten likaisuuksia ja Canadian Freeness-mittausten tuloksia tarkasteltaessa ja vertailtaessa niitä nollakokeesta saatuihin arvoihin. Parhaimman vaaleuden nousun antaneissa koeajoissa käytetty kemikaali oli koonnut kolloidaaliset epäpuhtauspartikkelit suuremmiksi agglomeraateiksi, joiden poistuminen vaahdotuksessa on hydrodynaamisista voimista johtuen tehokkaampaa. Näin ollen myös GSC, perinteisen flotaatiokennon tavoin, vaatii käytettävältä vaahdotuskemikaalilta erinomaisia kokoojaominaisuuksia.

Koeajoissa tehtyjen silmämääräisten havaintojen ja käytetyille kemikaaleille tehtyjen pintajännitysmittausten perusteella GSC:n oloissa on eduksi, mikäli kemikaalin hyvän kokoojaominaisuuden lisäksi kemikaalin vaikutuksesta stabiloituvan vaahdon muodostuminen on mahdollisimman runsasta. Epäpuhtauspartikkelien erottumiseen massasuspensiosta on GSC:ssä vallitsevalla keskipakovoimakentällä suuri merkitys. Pelkkä keskipakovoimakenttä ei kuitenkaan yksin riitä erottamaan suurtakaan osaa epäpuhtauspartikkeleista, mutta se mahdollistaa perinteistä runsaammin vaahtoavien kemikaalien käytön. Perinteisissä kennoissa partikkelien erottuminen perustuu lähinnä painovoimakentän hyväksikäyttöön, jolloin erottumisen aikaansaavat voimat ovat huomattavasti heikompia kuin GSC:ssä. Tämän johdosta voidaan GSC:ssä käyttää huomattavasti runsaammin vaahtoavaa kemikaalia ilman, että erottumisen epäselektiivisyys kasvaisi, kuten tapahtuu vastaavassa tilanteessa tavanomaista kennoa käytettäessä.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan sanoa, että GSC:n erotustehokkuuteen vaikuttavat sekä käytettyjen kemikaalien kokoojaominaisuudet että niiden muodostaman vaahdon runsaus. Todennäköistä on, että mitä voimakkaampia nämä ominaisuudet ovat sitä parempaan lopputulokseen päästään. Kemikaalin, jossa nämä molemmat ominaisuudet on optimoitu, löytäminen on varmasti vaikeaa. Tästä syystä on todennäköisempää, että parhaat tulokset saavutetaan käyttämällä useampien kemikaalien yhdistelmiä jakamalla annostelua pulpperoinnin ja vaahdotuksen kesken.

Hyvään lopputulokseen päästään todennäköisesti lisäämällä pulpperointiin hyvät dispergointi- ja kokoojaominaisuudet omaavaa kemikaalia, joka vastaisi pulpperoinnissa epä-

puhtauspartikkelien dispergoinnista ja agglomeroisi nämä partikkelit suuremmiksi ka-
saumiksi vaahdotusvaiheessa. Lisäksi prosessiin tulisi lisätä runsaasti vaahtoa muodostava
kemikaali juuri ennen vaahdotusta, jolloin saataisiin laitteessa vallitsevat olosuhteet
partikkelien erottumisen kannalta mahdollisimman suotuisiksi. Näiden oletusten vahvista-
miseksi on kuitenkin vielä tehtävä lisätutkimuksia.

Kemikaalikoeajoissa GSC:llä saadut tulokset olivat selvästi heikompia kuin rinnakkaismää-
rityksinä Outokumpu-kennolla tehdyistä laboratoriovaahdotuksista saadut vastaavat laitteen
tehokkuutta kuvaavat arvot. Saatu tulos oli sikäli yllättävä, että esikokeissa suoritetuissa
vertailuissa GSC:n ja Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennojen välillä oli GSC:n erotuste-
hokkuus aina perinteisiä kennoja parempi. Tähän mahdollisesti vaikuttaneita syitä on
useitakin, kuten esimerkiksi jo edellä mainitut rakenteelliset erot kokeissa käytettyjen
kahden GSC:n kesken. Tämän lisäksi kemikaalikoeajoissa FFRC:ssä käytettiin pulpperoi-
nissa ja massan laimennuksessa puhdasta raakavettä eikä tehtaan kiertovettä, kuten
Keräyskuitu Oy:llä. Kiertoveden mukana vaahdotukseen kulkeutuu siihen rikastunutta
hienoaainesta ja ylimäärin vaahdotuskemikaaleja, jotka molemmat vaikuttavat ensinnäkin
vaahoamiseen GSC:llä ja siten myös laitteen erotustehokkuuteen. Tästä johtuen onkin
tärkeää, että näiden kahden GSC-hydrosyklonin vertailu tehdäänkin juuri Keräyskuitu
Oy:n massalla, jolloin olosuhteet olisivat erotustehokkuuden kannalta optimaaliset.

GSC:hen syntyvän keskipakovoimakentän vaikutuksesta poistuu vaahdotuksessa todennä-
köisesti enemmän hienoaainesta kuin perinteisissä vaahdotuskennoissa. Tämä saattaa osal-
taan vaikuttaa eri tyyppisillä kennoilla saatuihin vaaleuden muutoksiin, sillä massan
sisältäessä runsaasti hienoaainesta syntyy tällaisesta massasta tehdyn vaaleusarkin pinnalle
runsaasti valon sirontaa lisääviä rajapintoja. Toisin sanoen arkin valonsirontakerroin (s)
kasvaa. Tämä merkitsee käytännössä sitä, että paperi vaikuttaa vaaleammalta, sillä osa
paperin sisään menneestä valosta heijastuu takaisin valon tulosuuntaan. Tämä saattoi myös
osaltaan vaikuttaa kemikaalikoeajoissa GSC:llä saatuihin Outokumpu-kennoa heikompiin
tuloksiin.

Mikäli tahmojen käyttäytymistä halutaan tutkia GSC:ssä, on syytä käyttää menetelmää,
jossa sulppuun annostellaan ylimäärin tahmopartikkeleita sekä lisätään otettujen näytteiden

määrää. Tällöin tahmojen lukumäärä eri jakeissa saadaan suuremmaksi ja tulokset luotettavammaksi. Toisaalta tämän koeajon puitteissa tahmojen määritykseen käytetty analyysimenetelmä ei varmasti ollut paras mahdollinen, joten luotettavien tulosten saaminen edellyttää myös analyysimenetelmän kehittämistä.

Pintajännitysmittauksissa on eduksi käyttää voimakkaampaa sentrifugointia, jolloin kolloidaalisten epäpuhtauspartikkelien poistuminen olisi tehokkaampaa. Tämä vähentäisi suodatukseen vaadittavaa aikaa ja samalla kyettäisiin vähentämään näiden partikkelien vaikutusta mittaustuloksiin.

Koeajojen yhteydessä tuli hyvin esiin kuinka tärkeää on ajatella siistausta kokonaisena prosessina, eikä tuijottaa pelkästään vain esimerkiksi vaahdotuksen optimointiin. Siistauksessa, kuten kaikissa muissakin prosesseissa, on todettavissa kaiken vaikuttavan kaikkeen ja jokaisen prosessivaiheen olevan jollakin tavalla yhteydessä toisiinsa esimerkiksi kiertovesien välityksellä. Näin ollen onkin järkevämpää aloittaa tietyn kohteen optimointi tarkastelemalla koko prosessia ja tehtävien muutosten mahdollista vaikutusta muihin prosessin vaiheisiin.

19. LÄHDELUETTELO

- /1/ Seppälä, S. Keräyspaperi ja sen käyttö. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus. 2. painos. Turku 1983, Suomen Paperi-insinöörien yhdistys/Teknillisten tieteiden akatemia. s. 483-496.
- /2/ Sheridan, G.P. Rohlf, E.A. Aston, D. Preventing Redeposition of Ink in a Deinking Operation Means Improved Recycled Fibre. Tappi Pulping Conference. Boston, MA, November 1-5, 1992. Atlanta 1992. TAPPI Press. s. 487-492.
- /3/ Ferguson, L. Deinking Chemistry: Part 1. Tappi J. 75(1992)7, s. 75-83.
- /4/ Janigan, D. Operating Experience of a Innovative Secondary Fiber System. 76th Annual Meeting, Montreal, Quebec, February 1-2, 1990. Montreal 1990, CPPA Technical Section. s. B321-B325.
- /5/ Estes, T. Highlights of the Latest Deinking and Cleaning Technologies. PaperAge, Recycling Annual 1990. s. 24-26.
- /6/ Lassus, A. Avsvärtning av Returpapper. Raisio Koncernen. 27 s.
- /7/ A. Ahlström Oy. Fibreflow drum. Esite. 7 s.
- /8/ University of Maine. Ahlstrom FF Drum vs. Escher Wyss High Consistency Batch Pulper. 1993. 5 s.
- /9/ Kamyr Inc. Kieffer Pulp Mills, Recycle Fibre Line System Operating Manual. March 1992. 448 s.
- /10/ Estes, T. Highlights of the Latest Deinking and Cleaning Technologies. Paper Age. Recycling Annual 1990. s. 24-26.
- /11/ Kotila, P. New Deinking Plant at Kaipola, Finland. Tappi Pulping Conference. Toronto, Ontario, October 14-17, 1990. Atlanta 1990. TAPPI Press. s. 351-356.
- /12/ Ahlström . MODUScreen for Recycled Fiber Pulp. Tekninen esite. 1992.
- /13/ Crow, D.R. Secor, R.F. The Ten Steps of Deinking. Tappi J. 70(1987)7, s. 101-106.
- /14/ Woodward, T.W. Deinking Chemistry. Chemical Processing Aids Short Course. Seattle, WA, April 10-12, 1991. Atlanta 1991. TAPPI Press. s. 85-105.
- /15/ Voith. Tekninen esite. 1989.

- /16/ Britz, H. Flotation Deinking-Basics and System Location. Conference of Selection and preparation of Fibers for Graphic Paper. Ravensburg, Germany, September 16-18, 1992. Escher Wyss Paper Technology. s. 07.
- /17/ Lamort. Tekninen esite. 1988.
- /18/ Pöyry, J. Uusiomassan valmistus. Lappeenranta 1982, Metsäteollisuuden työnantajaliitto, Puusta paperiin M-303. 85 s.
- /19/ Estes, T.K. Current Deinking Process in European Newsprint Mills. Tappi Pulping Conference. Toronto, Ontario, October 14-17, 1990. Atlanta 1990. TAPPI Press. s. 345-350.
- /20/ Pfalzer, L. Deinking Process Technology. Prog. Pap. Recycling 1(1992)2. s. 21-29.
- /21/ Raitio, L. The Deinking Process. Pap. Puu 73(1991)10, s.923-927.
- /22/ Wilharm, M. The Chemistry of Recycling. PIMA Magazine 73(1991)8, s. 54-55.
- /23/ Carmichael, D.L. The Use of Hydrogen peroxide in the Deinking of Newsprint. Pulp Pap. Can. 91(1990)10, s. T365-T368.
- /24/ Maier, J. Bleichverfahren zur Aufhellung holzhaltiger und holzfreier Faserstoffe. Wochenbl. Papierfabr. 121(1993)4. s.111-114.
- /25/ McCormick, D. Chemistry of Flotation and Washing for Deinking Newsprint. Part 2. Particle Interactions and Systems. Tappi Papermakers Conference. Orlando, FL, May 5-10, 1991. Atlanta 1991. TAPPI Press. s. 481-495.
- /26/ McCormick, D. Chemistry of Flotation and Washing for Deinking Newsprint. Introduction to Deink Process Chemistry. Tappi Pulping Conference. Toronto, Ontario, October 14-17, 1990. Atlanta 1990. TAPPI Press. s.357-364.
- /27/ Ferguson, L. The Role of Pulper Chemistry in Deinking. Tappi Pulping Conference. Orlando, FL, November 3-7, 1991. Atlanta 1991. TAPPI Press. s. 793-799.
- /28/ Lafreniere, S. Dessureault, S. Dubreuil, M. Devic, M. Bleaching Process for ONP/OMG, MOW, SWL and UB/OMG Deinked Pulps. Tappi Pulping conference. Atlanta, Georgia, November 1-3, 1993. Atlanta 1993. TAPPI Press. s. 885-903.
- /29/ Mathur, I. Chelant Optimization in Deinking Formulation. 1st Research Forum on Recycling. Toronto, Ontario, October 29-31, 1991. Montreal 1991. CPPA Technical Section. s. 49-55.

- /30/ Dionne, Y. In mill optimization of deinking chemicals by laboratory experiment. Pap. Technol. 1994:1, s. 37-42.
- /31/ Everett, D. H. Basic Principles of Colloid Science. The Royal Society of Chemistry, Great Britain London 1988, 243 s.
- /32/ Borchardt, J.K. An Introduction to Deinking Surfactants. Recycling Symposium. New Orleans, Louisiana, February 28 - March 4, 1993. Atlanta 1993. TAPPI Press. s. 131-151.
- /33/ Borchardt, J.K. Chemical Structure-Property Relationships of Deinking Surfactants. Prog. Pap. Recycling 1(1992)2, s. 45-60.
- /34/ Borchardt, J.K. A Primer for surfactants Used in Deinking. Prog. Pap. Recycling 1(1992)11, s. 55-63.
- /35/ Shrinath, A. Szewczak, T. Bowen, J. A Review of ink-removal techniques in current deinking technology. Tappi J. 74(1991)7, s.85-93.
- /36/ Lassus, A. Henkilökohtainen palaveri. Raisio. 22.10.1993.
- /37/ Putz, H.-J. Schaffrath, H.-J. Götsching, L. Deinking of Oil- and Water-born Printing Inks - A New Flotation deinking Model. 1 st Research Forum on Recycling. Toronto, Ontario, October 29-31, 1991. Montreal 1991. CPPA Technical Section. s. 183-190.
- /38/ Hornfeck, K. Chemie und Wirkungsweise der Tenside als Sammlerchemikalien für Druckfarben und Fullstoffe im Flotations-Deinking-Prozess. Wochenbl. Papierfabr. 113(1985)11, s. 646-649.
- /39/ Suwala, D. W. Feigenbaum, H. N. A Study of the Deinking Efficiency of Nonionic Surfactants. Tappi Pulping Conference. Houston, TX, October 24-26, 1983. Atlanta 1983. Tappi Press. s. 533-541.
- /40/ Okada, Y. Wastepaper Deinking Chemicals. Jpn. Pulp Pap. 29(1992)4, s. 35-38.
- /41/ Stenius, P. Kirjallinen tiedonanto.
- /42/ Larsson, A. Stenius, P. Ödberg, L. Surface Chemistry in Flotation Deinking. Part 1. The Floatability of Model Ink Particles. Svensk Papperstidn. 87(1984)18, s. R158-R164.
- /43/ Larsson, A. Stenius, P. Ström, G. Zur Oberflächenchemie des deinking Prozesses. Wochenbl. Papierfabr. 110(1982)14, s. 502-506.

- /44/ Larsson, A. Surface Chemistry in Flotation Deinking. Pap. Technol. 28(1987)1, s. 388-390.
- /45/ Olson, C.R. Letscher, M.K. Increasing the Use of Secondary Fiber: An Overview of Deinking Chemistry and Stickies Control. Appita J. 45(1992)2, s. 125-130.
- /46/ Ferguson, L. Deinking Chemistry: Part 2. Tappi J. 75(1992)8, s. 49-57.
- /47/ Daubitz, F. A New Waste Paper De-inking Chemistry and Process. Tappi Pulping Conference. Boston, MA, November 1-5, 1992. Atlanta 1992. TAPPI Press. s. 1195-1203.
- /48/ Ortner, H. E. Recycling of Papermaking Fibers - Flotation Deinking. Atlanta, TAPPI Publication (1981).
- /49/ Bechstein, G. Einsatz von Chemikalien und deren Auswirkungen auf Physiko-chemische Vorgänge beim Deinking-Flotationprozess. Österr. Papier 12(1975)4, s. 16-22.
- /50/ Horacek, R. G. Jarrehult, B. Chemical Application Expands in Washing/Flotation Deinking Systems. Pulp Pap. 63(1989)3, s. 97-99.
- /51/ Marchildon, L. Castro, C. LaPointe, M. Daneault, C. Comparison between CO₂ and Air in the Batch Flotation. Tappi Pulping Conference. Boston, MA, November 1-5, 1992. Atlanta 1992. Tappi Press. s. 957-962.
- /52/ Elsby, L. Opposites Attract in Deinking. PaperAge 108(1992)1, s. 24.
- /53/ Ellis, M. E. Balancing Additive Costs and Brightness in Deinked Fiber Production. PaperAge, Recycling Update 1992. s. 16-17.
- /54/ Lassus, A. The Chemistry of Deinking. Raisio Chemicals. 20 s.
- /55/ Moreland, R. Changes in Deinking Chemistry. PIMA Magazine 74(1992)6, s. 50-52.
- /56/ EKA Nobel Oy. Nobel Industries. tuote-esite.
- /57/ Sturmer, L. Ulubay, H. Emulsionen - eine Vorteilhafte Anwendungsform von Deinking Chemikalien. PTS-Deinking Symposium. München, 1981.
- /58/ McCready, M. The Deinkers Quest: In Search of the Great Agglomerator. PaperAge, Recycling Annual 1991. s. 16-17.
- /59/ Stenius, P. Foam: Formation, Stability, Breaking. Surface chemistry of paper-making chemicals conference. Finnish Chemical Society. Helsinki, January 1993. 26 s.

- /60/ Wood, D. L. Alcohol Ethoxylates and Other Nonionics as Surfactants in the Deinking of Waste Paper. Tappi Pulping Conference. Toronto, Ontario, October 25-27, 1982. Atlanta 1982. Tappi Press. s. 435-446.
- /61/ Putz, H.-J. Wu, S. Göttching, L. Enzymatische Behandlung von Altpapier. Papier 44(1990)10, s. V42-V48.
- /62/ Jackson, L. S. Heitmann, J. A. Joyce, T. W. Enzymatic Modifications of Secondary Fiber. Tappi J. 76(1993)3, s. 147-154.
- /63/ Prasad, D. Y. Heitmann, J. A. Joyce, T. W. Enzymatic Deinking of Colored Offset Newsprint. Nord. Pulp Pap. Res. J. (1993)2, s. 284-286.
- /64/ Ow, S. S.-K. Biological De-inking Methods of Newsprint Wastepaper. World Pulp and Paper Technology (1992)1, s. 63-66.
- /65/ Linck, E. Ink and Speck Removal Efficiency - A Matter of the Right Flotation Cells. Tappi Pulping Conference. Toronto, Ontario, October 14-17, 1990. Atlanta 1990. TAPPI Press. s. 123-131.
- /66/ Pan, R. Bousfield, D. W. Thompson, E. V. Modelling Particle-Bubble Dynamics and Adhesion in Air Bubble/Solid Particle/Liquid Systems. Tappi Pulping Conference. Boston, MA., November 1-5, 1992. Atlanta 1992. TAPPI Press. s. 941-956.
- /67/ Larsson, A. Stenius, P. Ödberg, L. Surface Chemistry in Flotation Deinking. Part 2. The Importance of Ink Particle Size. Svensk Papperstidn. 87(1984)18, s. R165-R169.
- /68/ Britz, H. Flotationsdeinking - Grundlagen und Systemeinbindung. Wochenbl. Papierfabr. 121(1993)10, s. 394-401.
- /69/ Larsson, A. Stenius, P. Ödberg, L. Surface Chemistry in Flotation Deinking. Part 3. Deposition of Ink and Calcium Soap Particles on Fibers. Svensk Papperstidn. 88(1985)3, s. R2-R7.
- /70/ Ali, T. McLellan, F. Adiwinata, J. May, M. Evans, T. Functional and Performance Characteristics of Soluble Silicates in Deinking. Part 1: Alkaline Deinking of Newsprint/Magazine. 1st Research Forum on Recycling. CPPA, Technical Section. October 29-31, 1991, Toronto. s. 21-29.
- /71/ Ferguson, L.D. A Review of Flotation Deinking Technology. Prog. Pap. Recycling 1(1991)11, s. 17-23.

- /72/ Dodson, M. Lowell, D. Proper Deinking Chemistry, Bleaching Technique Crucial to Pulp Brightness. Pulp Pap. 64(1990)9, s. 190-193.
- /73/ Chamblee, J. W. Greenwood, B. F. Evaluation of High Throughput, High Consistency Deinking Technology. Tappi Pulping Conference. Orlando, FL, November 3-7, 1991. Atlanta 1991. TAPPI Press. s. 241-246.
- /74/ Kytölä Oy. Gas Measurement with Standard Air-flowmeters. Rotametrien valmistajan ohje. 2 s.
- /75/ Saint Amand, F. J. Principles and Technology of Cleaning. Advanced Training Course on Deinking Technology. Grenoble, France, November 30 - December 1, 1993. Centre Technique du Papier 1993. s. 13/1-13/30.
- /76/ Diehl, D. Inlet Pressure Key to Efficient Operation of Reverse Cleaners. Pulp Pap. 56(1982)3, s. 134-138.
- /77/ Bliss, T. Reverse Cleaning. Tappi J. 63(1980)6, s. 87-90.

LIITELUETTELO

1. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 1.
2. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 2.
3. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 3.
4. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 4.
5. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 5.
6. Esikokeen olosuhteet ja tulokset	Liite 6.
Määrityksissä käytetyt ei-standardi analyysimenetelmät	Liite 7.
Koeajojen syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä valmistetut katseluarkit	Liite 8.
Laboratorioanalyysien tulokset	Liite 9.
Tuhka- ja kuiturejektin laskentakaavat	Liite 10.
Diplomityöhön liitetty lisäkokeet	Liite 11.

1. Esikokeen olosuhteet ja tulokset

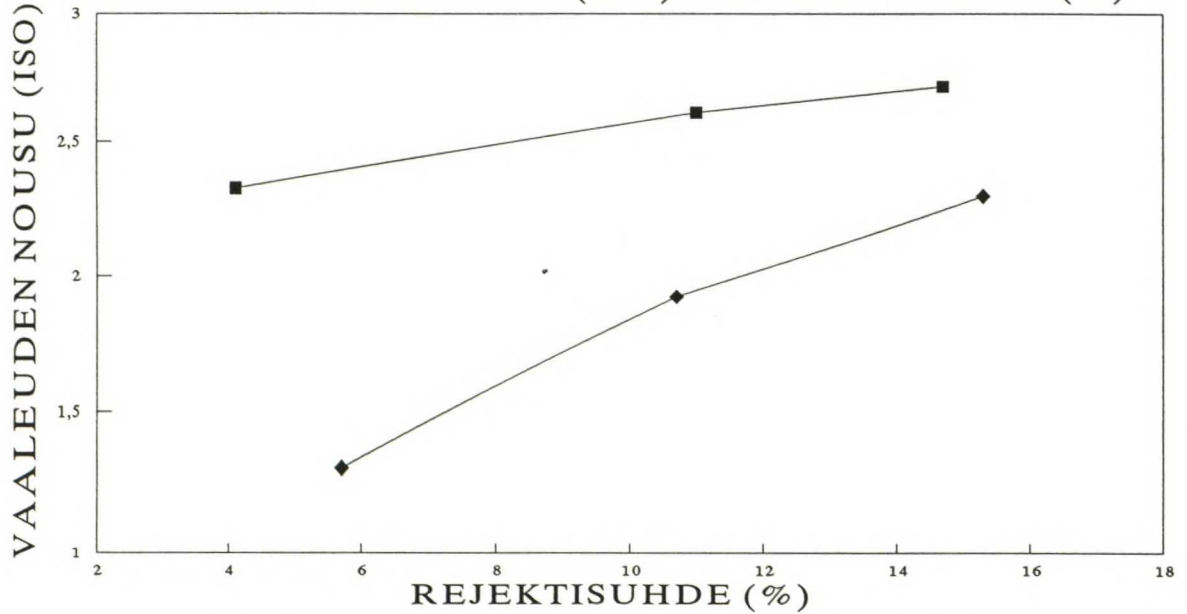
- Ahlström tutkimuskeskus
- raaka-aine (vaaleus 52-53 ISO, tuhkapit. 11 %)
- syöttövirtaus 750 l/min ja 850 l/min
- syöttösakeus 2,0 %
- rejektisuhde 5 %, 10 % ja 15 %
- ilmamäärä 1,7* ja 2,5* syöttövirtaus

ESIKOE 1.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
750 l/min	2,0 %	5,0 %	1,7*	2,33	1,84
			2,5*	1,99	2,10
		10,0 %	1,7*	2,61	4,85
			2,5*	2,17	4,66
		15,0 %	1,7*	2,71	8,25
			2,5*	2,53	8,66
850 l/min	2,0 %	5,0 %	1,7*	1,31	1,28
			2,5*	1,58	1,97
		10,0 %	1,7*	1,92	4,54
			2,5*	2,00	4,19
		15,0 %	1,7*	2,30	9,53
			2,5*	1,77	8,02

G S C E S I K O K E E T

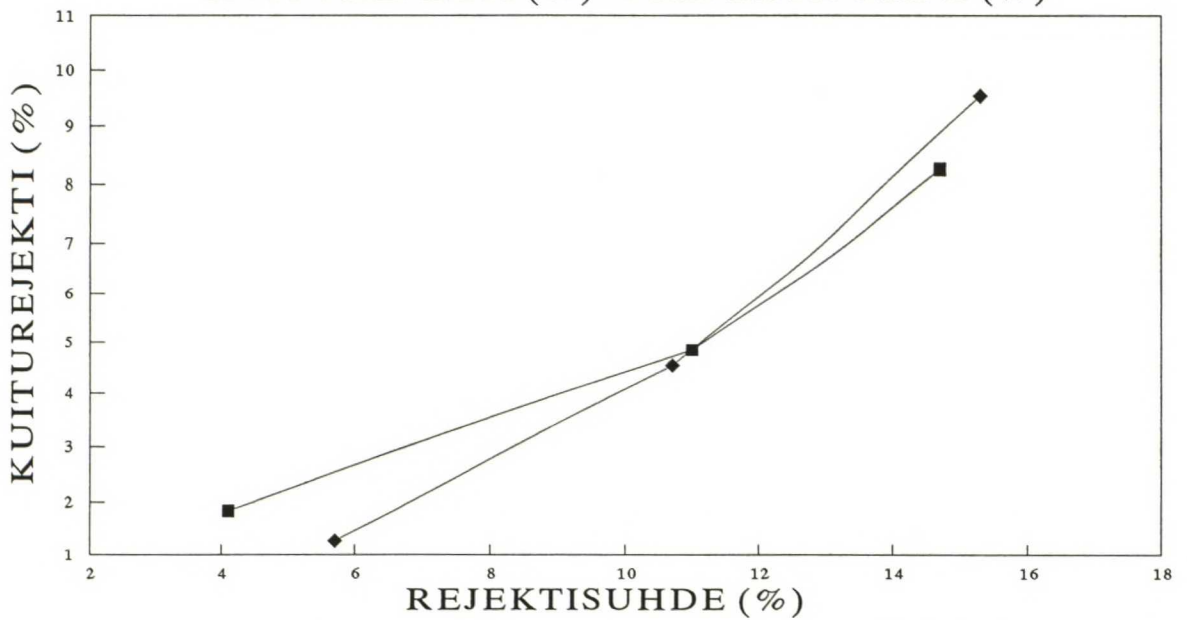
VAALEUDEN NOUSU (ISO) vs REJEKTISUHDE (%)



■ syöttövirtaus 750 l/min ◆ syöttövirtaus 850 l/min
 syöttösakeus 2,0 % ilmamäärä 1,7* syöttövirtaus
 17.5.1993

G S C E S I K O K E E T

KUITUREJEKTI (%) vs REJEKTISUHDE (%)



■ syöttövirtaus 750 l/min ◆ syöttövirtaus 850 l/min
 syöttösakeus 2,0 % ilmamäärä 1,7* syöttövirtaus
 17.5.1993

2. esikokeen olosuhteet ja tulokset

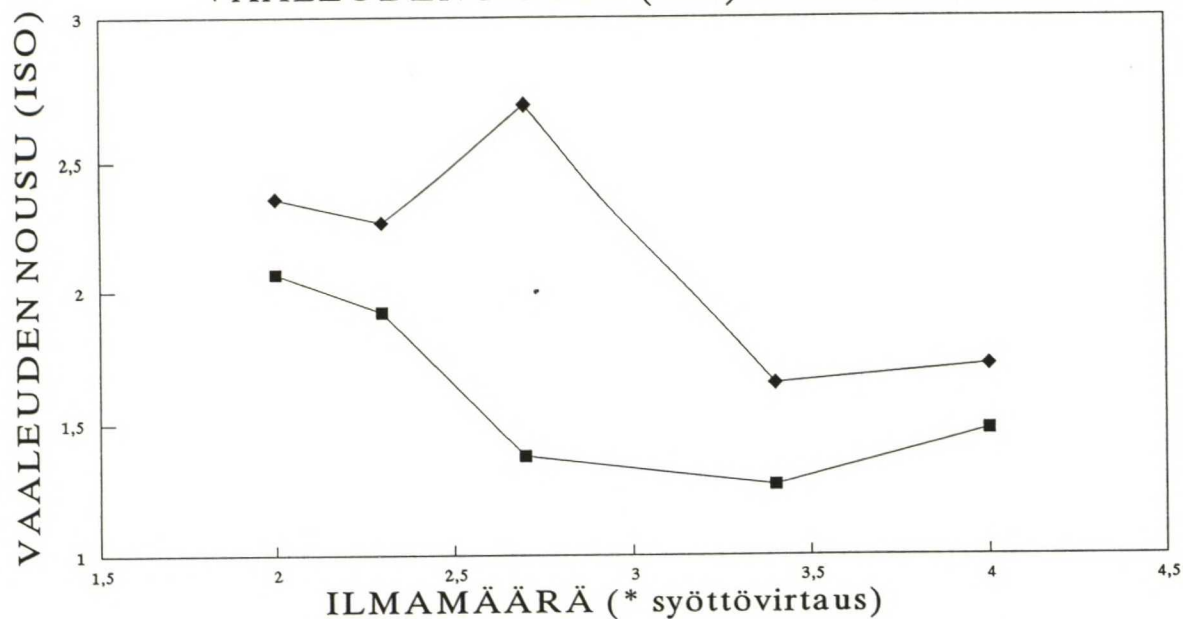
- Ahlström tutkimuskeskus
- raaka-aine (vaaleus 48-50, tuhkapit. 16 %)
- syöttövirtaus 750 l/min
- syöttösakeus 1,0 % ja 2,0 %
- rejektisuhde 10 %
- ilmakerroin 2,0*, 2,3*, 2,7*, 3,4* ja 4,0* syöttövirtaus

ESIKOE 2.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
750 l/min	1,0 %	10,0 %	2,0*	2,07	4,04
			2,3*	1,92	4,25
			2,7*	1,38	3,83
			3,4*	1,27	3,98
			4,0*	1,48	4,13
750 l/min	2,0 %	10,0 %	2,0*	2,37	5,43
			2,3*	2,28	3,89
			2,7*	2,69	3,82
			3,4*	1,65	5,51
			4,0*	1,72	5,05

G S C E S I K O K E E T

VAALEUDEN NOUSU (ISO) vs ILMAMÄÄRÄ



■ syöttösakeus 1,0 % ◆ syöttösakeus 2,0 %

syöttövirtaus 750 l/min rejektisuhde 10 %
3.6.1993

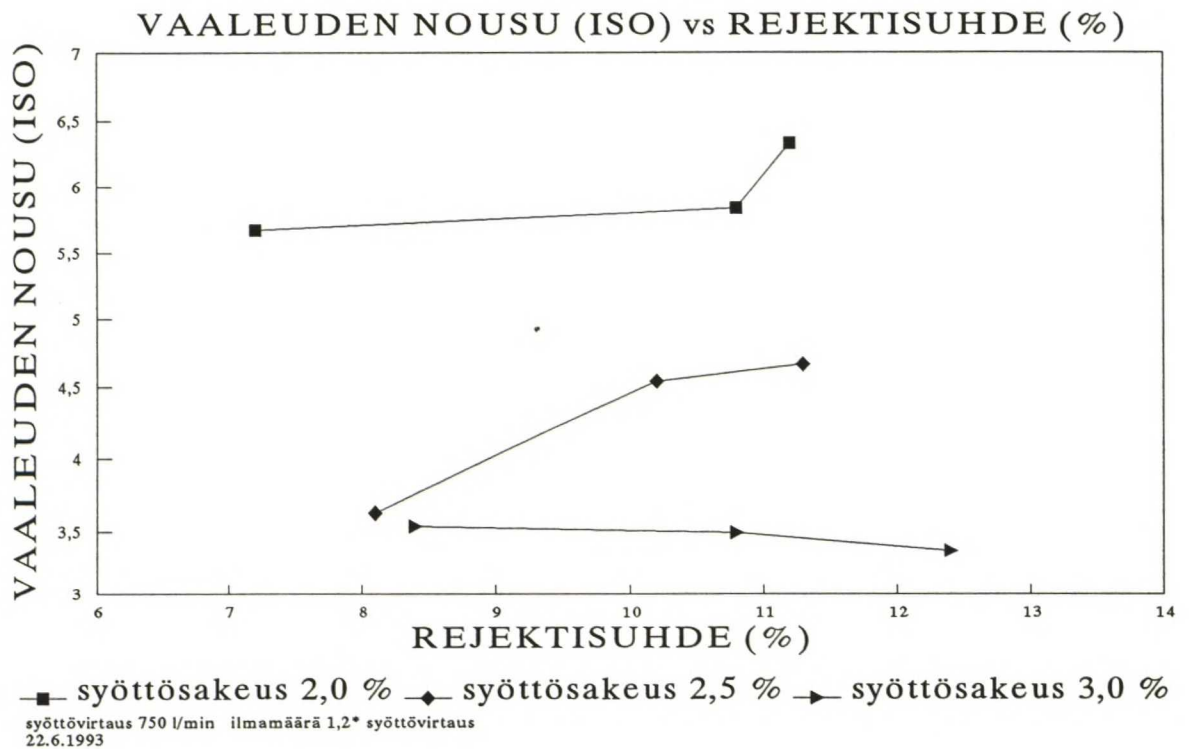
3. esikokeen olosuhteet ja tulokset

- Keräyskuitu Oy
- raaka-aine (vaaleus 47-48 ISO, tuhkapit. 14-18%)
- syöttövirtaus 750 l/min
- syöttösakeus 2,0 %, 2,5 % ja 3,0 %
- rejektisuhde 8 %, 10 % ja 12 %
- ilmakerroin 1,2*, 1,8*, 2,4* ja 3,0* syöttövirtaus

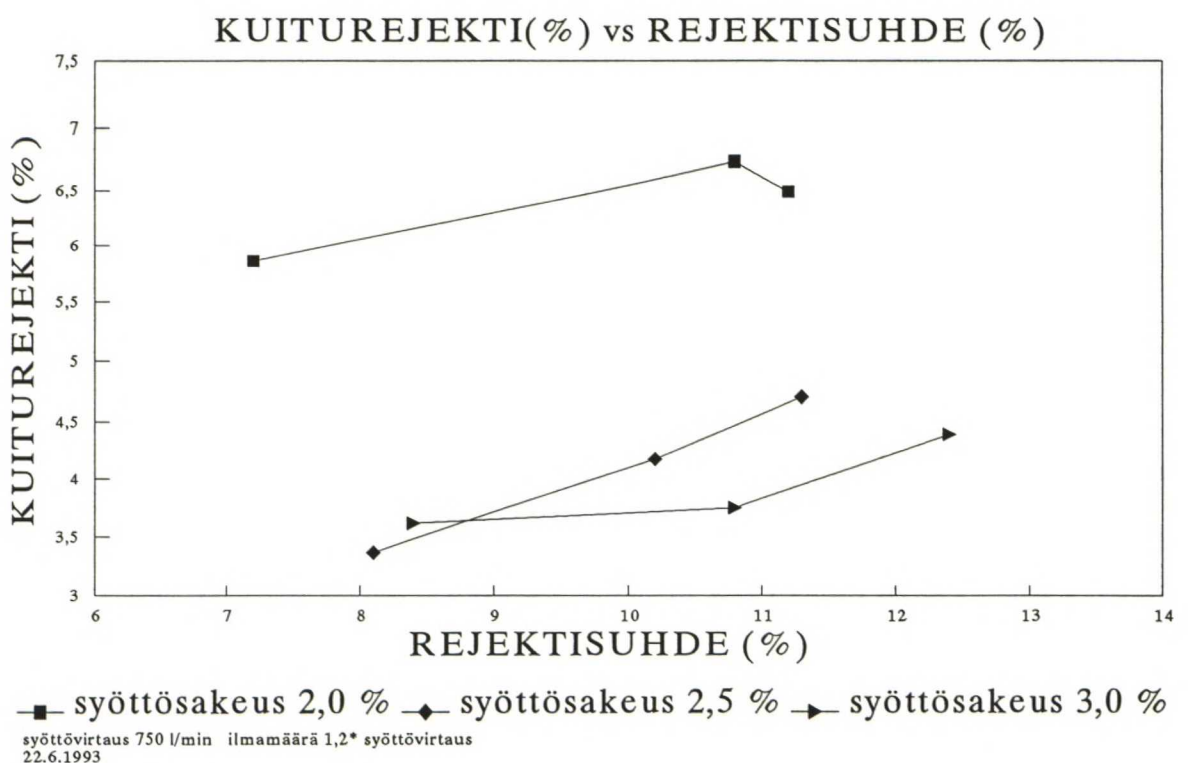
ESIKOE 3.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
750 l/min	2,0 %	8,0 %	1,2*	5,67	5,86
		10,0 %	1,2*	5,84	6,74
		12,0 %	1,2*	6,33	6,49
			1,8*	5,48	6,99
			2,4*	6,74	7,21
			3,0*	5,90	7,15
	2,5 %	8,0 %	1,2*	3,63	3,37
		10,0 %	1,2*	4,54	4,18
			1,8*	4,24	3,85
		12,0 %	1,2*	4,66	4,71
			1,8*	4,68	4,38
			2,4*	4,68	4,80
			3,0*	4,39	4,52
	3,0 %	8,0 %	1,2*	3,54	3,62
			1,8*	4,34	3,43
			2,4*	3,48	2,86
			3,0*	3,39	3,33
		10,0 %	1,2*	3,49	3,75
			1,8*	3,84	–
			2,4*	3,69	3,73
			3,0*	3,91	4,18
		12,0 %	1,2*	3,35	4,39
			1,8*	4,06	3,49
			2,4*	4,44	4,77

G S C E S I K O K E E T



G S C E S I K O K E E T



4. esikokeen olosuhteet ja tulokset

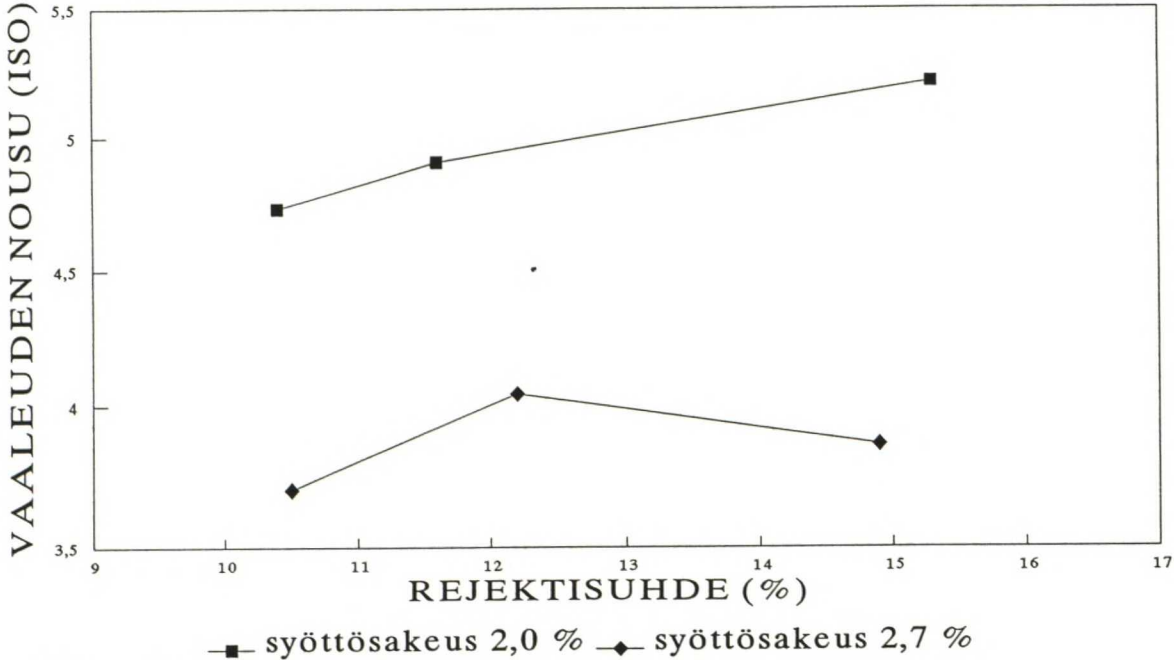
- Keräyskuitu Oy
- raaka-aine (vaaleus 47-50 ISO, tuhkapit. 13-19 %)
- syöttövirtaus 850 l/min
- syöttösakeus 2,0 % ja 2,7 %
- rejektisuhde 10 %, 12 % ja 15 %
- ilmakerroin 1,2*, 1,8*, 2,4* ja 2,6*

ESIKOE 4.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
850 l/min	2,0 %	10,0 %	1,2*	4,74	5,07
		12,0 %	1,2*	4,91	5,47
			1,8*	4,69	5,04
			2,4*	4,43	4,90
			2,6*	3,88	4,78
		15,0 %	1,2*	5,21	6,86
			1,8*	6,00	6,65
			2,4*	5,19	5,71
			2,6*	5,50	5,56
	2,7 %	10,0 %	1,2*	3,71	4,02
			1,8*	3,74	4,07
			2,4*	4,01	3,81
			2,6*	4,37	3,20
		12,0 %	1,2*	4,04	4,72
			1,8*	5,03	4,46
			2,4*	4,36	4,24
			2,6*	4,02	4,60
		15,0 %	1,2*	3,86	6,57
			1,8*	5,28	6,16
			2,4*	4,21	5,81
			2,6*	3,26	5,22

G S C E S I K O K E E T

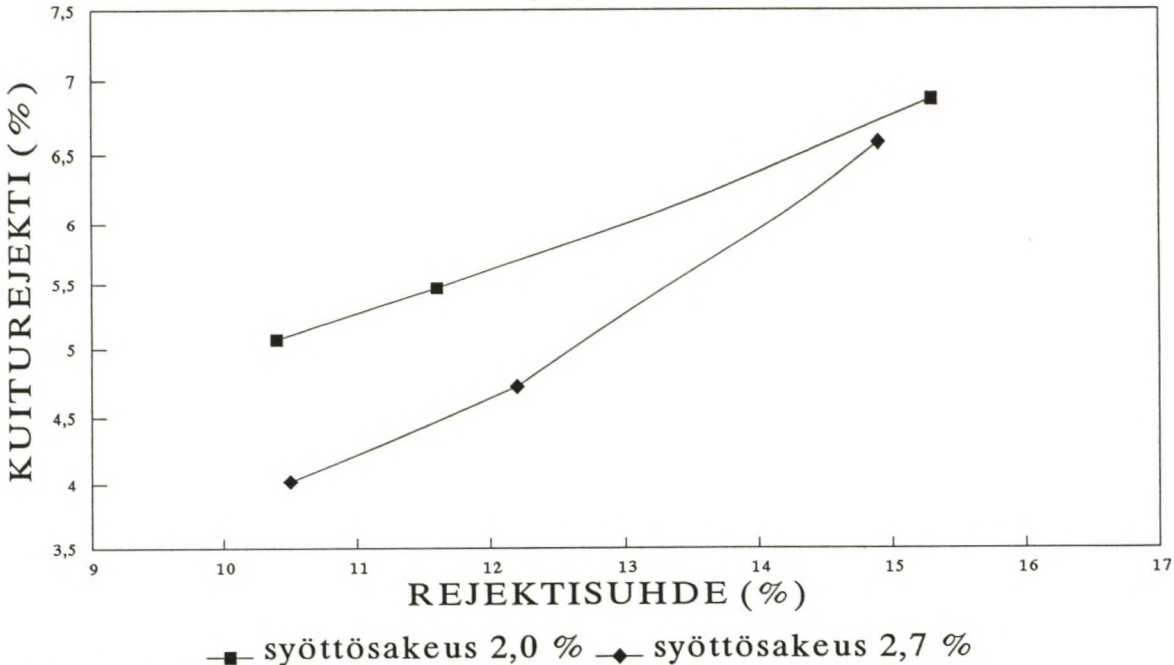
VAALEUDEN NOUSU (ISO) vs REJEKTISUHDE (%)



syöttövirtaus 850 l/min ilmamäärä 1,2* syöttövirtaus
13.7.1993

G S C E S I K O K E E T

KUITUREJEKTI (%) vs REJEKTISUHDE (%)



syöttövirtaus 850 l/min ilmamäärä 1,2* syöttövirtaus
13.7.1993

5. esikokeen olosuhteet ja tulokset

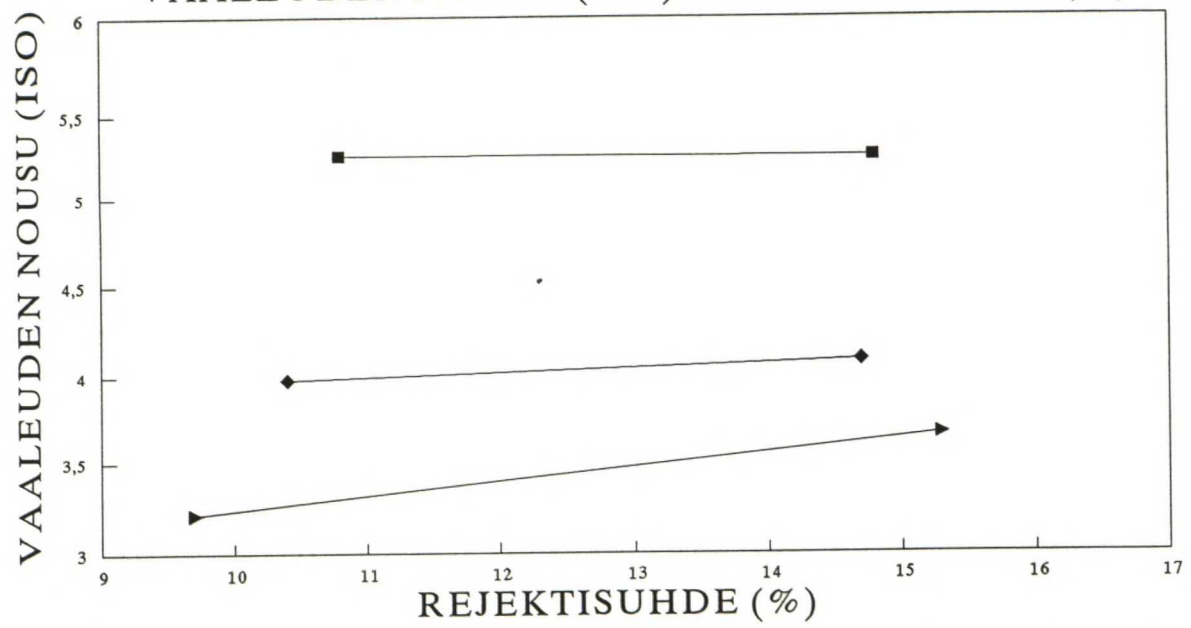
- Keräyskuitu Oy
- raaka-aine (vaaleus 48-50 ISO, tuhkapit. 15-20 %)
- syöttövirtaus 950 l/min
- syöttösakeus 2,4 %, 2,7 % ja 3,1 %
- rejektisuhde 10 % ja 15 %
- ilmakerroin 1,5* ja 2,0* syöttövirtaus

ESIKOE 5.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
950 l/min	2,4 %	10,0 %	1,5*	5,26	4,65
			2,0*	4,25	4,16
		15,0 %	1,5*	5,27	5,82
			2,0*	5,19	5,95
	2,7 %	10,0 %	1,5*	3,98	4,45
			2,0*	4,37	3,97
		15,0 %	1,5*	4,10	6,15
			2,0*	4,26	6,03
	3,1 %	10,0 %	1,5*	3,21	3,94
			2,0*	3,00	3,93
		15,0 %	1,5*	3,67	5,99
			2,0*	3,09	5,89

G S C E S I K O K E E T

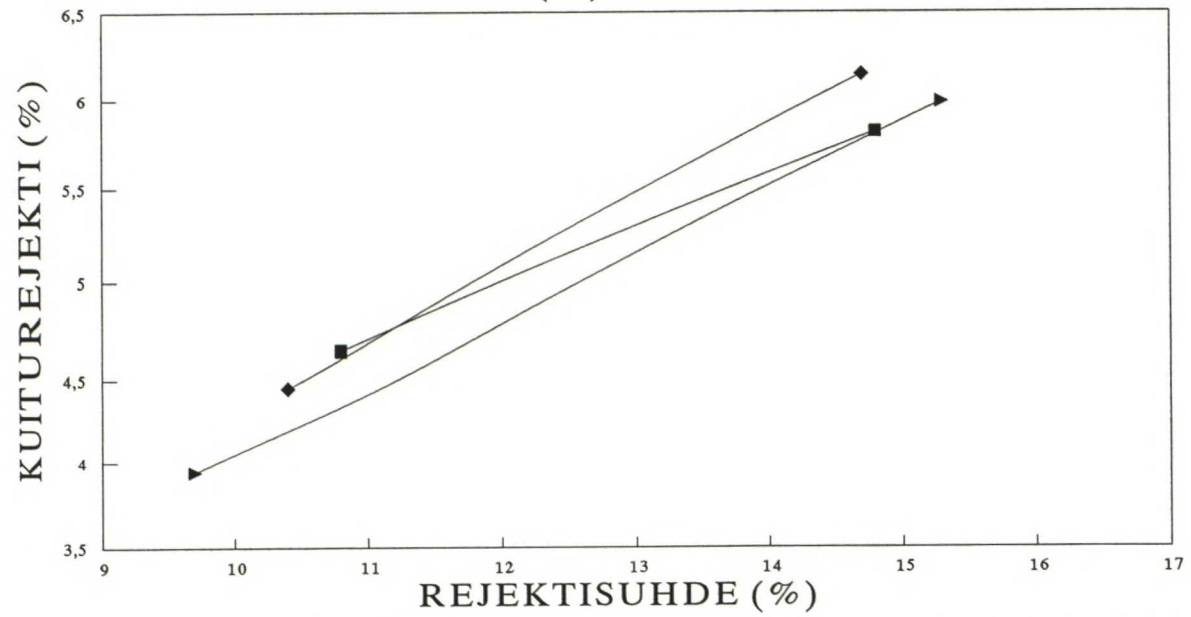
VAALEUDEN NOUSU (ISO) vs REJEKTISUHDE (%)



■ syöttösakeus 2,4 % ◆ syöttösakeus 2,7 % ➤ syöttösakeus 3,1 %
syöttövirtaus 950 l/min ilmamäärä 1,5* syöttövirtaus
27.7.1993

G S C E S I K O K E E T

KUITUREJEKTI (%) vs REJEKTISUHDE (%)



■ syöttösakeus 2,4 % ◆ syöttösakeus 2,7 % ➤ syöttösakeus 3,1 %
syöttövirtaus 950 l/min ilmamäärä 1,5* syöttövirtaus
27.7.1993

6. esikokeen olosuhteet ja tulokset

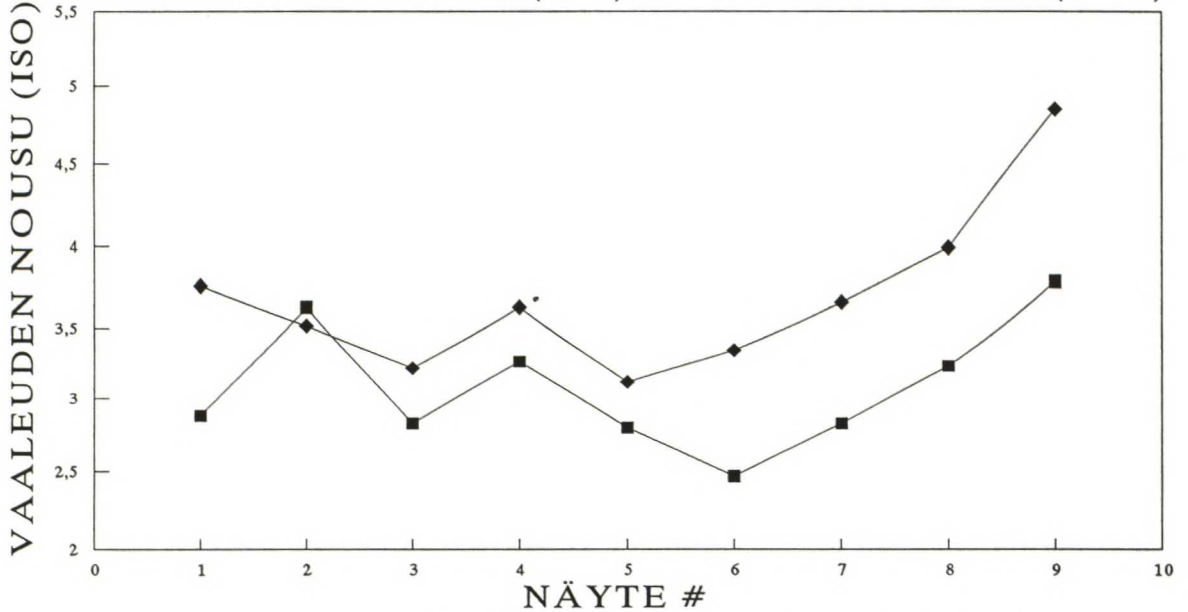
- Keräyskuitu Oy
- raaka-aine (vaaleus 42-43 ISO, tuhkapit. 19-20 %)
- syöttövirtaus 750 l/min ja 950 l/min
- syöttösakeus 2,5 %
- rejektisuhde 12 %
- ilmakerroin 1,5* syöttövirtaus

ESIKOE 6.

SYOTTO- VIRTAUS	SYOTTO- SAKEUS	REJEKTISUHDE	ILMAMAARA	VAALEUDEN- NOUSU	KUITU- REJEKTI
750 l/min	2,5 %	12,0 %	1,5*	2,88	4,98
				3,64	4,95
				2,83	4,77
				3,27	5,12
				2,80	4,89
				2,47	4,92
				2,83	5,09
				3,24	5,08
				3,79	5,29
950 l/min	2,5 %	12,0 %	1,5*	3,77	5,18
				3,52	5,16
				3,22	4,87
				3,64	4,91
				3,12	4,94
				3,35	5,02
				3,67	5,49
				3,99	5,84
				4,85	5,99

G S C E S I K O K E E T

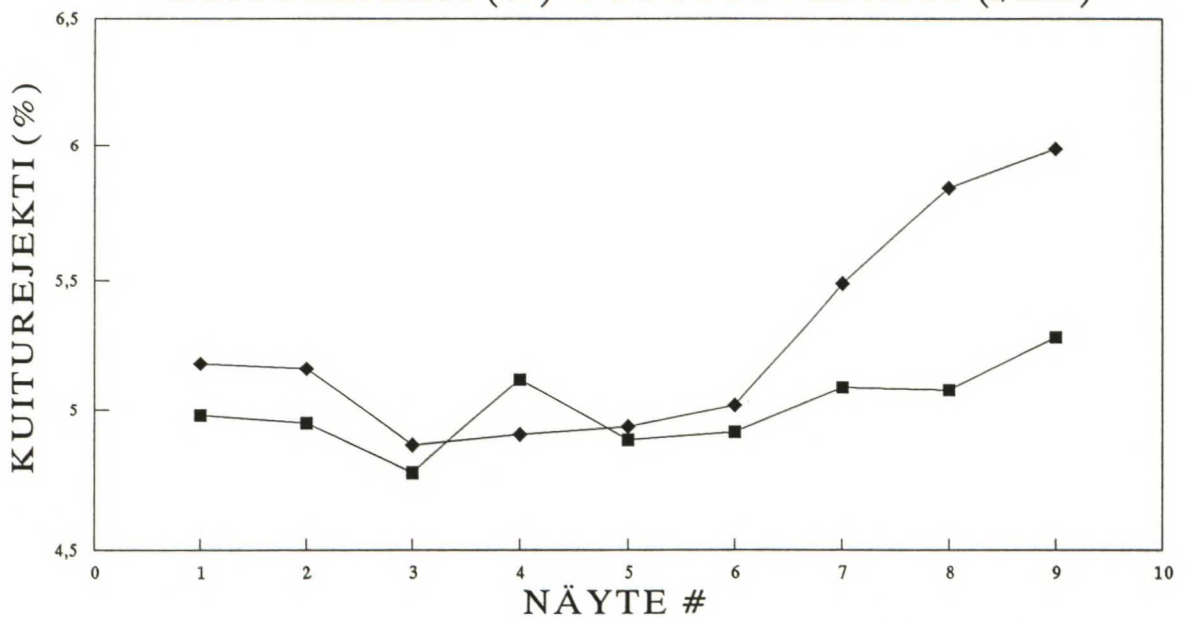
VAALEUDEN NOUSU (ISO) vs SYÖTTÖVIRTAUS (l/min)



■ syöttövirtaus 750 l/min ♦ syöttövirtaus 950 l/min
 syöttösakeus 2,5 % rejektisuhde 12 % ilmamäärä 1,5* syöttövirtaus
 10.8.1993

G S C E S I K O K E E T

KUITUREJEKTI (%) vs SYÖTTÖVIRTAUS (l/min)



■ syöttövirtaus 750 l/min ♦ syöttövirtaus 950 l/min
 syöttösakeus 2,5 % rejektisuhde 12 % ilmamäärä 1,5* syöttövirtaus
 10.8.1993

Metallipitoisuuden määrittäminen

Massanäytteet kuivattiin lämpökaapissa 105 °C:ssa ja kuivattu näyte tuhkitettiin 575 °C:ssa. Metallit liuotettiin tuhkasta typpihappomärkäpoltolla suljetuissa teflon-PFA-astioissa käyttämällä CEM MDS-2000 mikroaaltohajotuslaitteistoa. Hajotuksessa käytettiin 150 mg näytettä ja 10 ml väkevää typpihappoa (Merck, suprapur-laatu). Hajotuksen jälkeen näytteet suodatettiin ja laimennettiin 100 ml:aan ultrapuhtaalla vedellä. Sarjassa oli näytteiden lisäksi mukana sokeanäyte, joka sisälsi reagenssit.

Metallit analysoitiin liuoksista atomiabsorptiospektrometrisesti liekkitekniikalla käyttäen Perkin Elmer 4100-laitetta.

Tulokset ilmoitettiin yksiköissä $\mu\text{g/g}$ kuivaa massa kohti.

pH:n määrittäminen

pH mitattiin standardista SCAN-P14:65 poiketen suoraan massasta.

Mustepartikkelien kokojakauma

Mustepartikkelin kokojakauma määritettiin Optomax Image Analyzer:lla. Näytetyynyt valmistettiin ahlströmin analyysiohjeen AHL.16 mukaisesti, jossa:

1. Sulpun sakeuden määrittämisen jälkeen punnitaan tarvittava näytteen määrä, joka vastaa 1 g uunikuivaa massaa.
2. Punnitun näytteen kokonaistilavuudeksi säädetään tislattulla vedellä tasan 2500 ml ja sekoitetaan mahdollisimman homogeeniseksi. Tässä vaiheessa sakeus on syytä tarkistaa. Suodatetaan 250 ml sulppua punnitun suodatinpaperin läpi Büchner-suppilossa, kuivataan pikakuivaimessa ja punnitaan. Näytteen painoksi tulisi saada $0,100 \text{ g} \pm 5 \%$.
3. Mitataan 25 ml sulppua mittalasiin ja laimennetaan tislattulla vedellä 200 ml:ksi. Tämä kaadetaan membraanisuoattimeen, jossa on selluloosanitraatti membraanisuoatinta (0,45 μm , halk 90 mm) paikoillaan. Mittalasi huuhdellaan pienellä määrällä vettä ja vesi-imu käännetään päälle.
4. Suodatinkiekko asetetaan imukartonkien väliin ja kuivataan varovasti pikakuivaimella (n. 30 sek.).

5. Koepistettä kohti tulee valmistaa vähintään neljä näytetyynyä, joihin tulee merkitä koepisteen numero ja päivämäärä.

Varsinainen mustepartikkelien kokojakauman määrittäminen suoritettiin Kamyryn laboratoriostandardin No. I-19 mukaisesti:

1. Aseta näytetyyny lasilevylle kalibroidun Optomax Image Analyzer laitteen kameran alle mahdollisimman keskelle valoaukkoa ja peitä näyte toisella lasilevyllä.
2. Säädä laitteen harmaataso oikeaksi saadaksesi partikkelit kunnolla esiin ("Direct-arvo" noin 150-160).
3. Valmistetuista näytetyynyistä otetuista lukemista tulee partikkelien lukumääräksi saada vähintään 1000 kappaletta. Tämä tehdään alla olevan menetelmän 1. mukaisesti. Jos tällä menetelmällä ei kuitenkaan saavuteta 1000:n partikkelin rajaa, aloitetaan testaus alusta käyttäen menetelmää 2.

Mikäli toisellakaan menetelmällä ei päästä 1000:een partikkeliin tehdään mittaus menetelmän 3. mukaisesti. Jos tällöinkään ei saavuteta 1000:n partikkelin rajaa on näyte liian puhdas, jotta siitä saataisiin tarkkoja tuloksia ilman aikaavieviä mittauksia.

Testausmenetelmät:

- 1) Otetaan 25 lukemaa jokaisesta neljästä näytetyynystä -> 100 lukemaa per näyte.
- 2) Otetaan 50 lukemaa jokaisesta neljästä näytetyynystä -> 200 lukemaa per näyte.
- 3) Valmistetaan neljä näytetyynyä lisää ja otetaan 50 lukemaa jokaisesta kahdeksasta tyynystä -> 400 lukemaa per näyte.

4. Partikkelit jaetaan halkaisijansa mukaan seuraaviin kokoluokkiin:

0,02-0,04, 0,04-0,06, 0,06-0,08, 0,08-0,10, 0,10-0,14, 0,14-0,18, 0,18-0,22, 0,22-0,26, 0,26-0,35, 0,35-0,50, 0,50-1,00 ja 1,00-1,50 mm

Suodoksen likaisuus

1. Sulpun sakeuden määrittämisen jälkeen lasketaan ja punnitaan tarvittava määrä, joka laimennetaan 200 ml:ksi 1,0 %:sta sulppua.
2. valmistettu 1,0 %:nen sulppu suodatetaan Büchner-suppilossa suodatinpaperin läpi ja suodos otetaan talteen.
3. saadusta suodoksesta mitataan 50 ml, joka suodatetaan selluloosanitraatti membraanisuodattimen läpi (0,45 μ m, halk. 90 mm). Suodatinkiekko kuivataan varovasti imukartonkien välissä pikakuivaimessa (n. 30 s.), jonka jälkeen sen vaaleus mitataan. Samasta suodoksesta tehdään vähintään kaksi rinnakkaismäärittystä.

Tuhkapitoisuuden määrittäminen

Tuhkapitoisuus määritettiin Ahlströmmän analyysiohjeen AHL.7 mukaisesti, jossa:

1. Homogenoitua massanäytettä punnitaan n. 10 g ka. vastaava määrä.
2. Se sakeutetaan Büchner-suppilossa punnitulle vakioidulle suodatinpaperille (Whatman 41) (d).
3. Massakakkua kuivataan pikakuivaimessa n. 1 h tai kuivatuskaapissa (105 °C) yön yli. Massakakku jäähdytetään eksikaattorissa.
4. Kun massakakku on jäähtynyt, se punnitaan (c) ja revitään pieniksi paloiksi vakioituun ja punnittuun posliiniupokkaaseen (b).
5. Upokas laitetaan tuhkastusuuniin, jossa hiiltemislämpö on 350 °C (n. 3 h) ja polttolämpö 750 °C (10 h). Polton jälkeen upokas jäähdytetään eksikaattorissa.
6. Jäähtynyt upokas punnitaan analyysivaa'alla (a). Tyhjän upokkaan vakiointi suoritetaan samalla tapaa kuin poltto.

7. Tulos ilmoitetaan seuraavasti:

$$\text{Tuhkapitoisuus, \%} = \frac{(a - b)}{(c - d)} \times 100 \%$$

missä

a on tuhka + upokas, g
b upokas, g
c kuivattu massakakku + suodatinpaperi, g
d suodatinpaperi, g

Tahmojen määrittäminen

Tahmot määritettiin Ahlströmmän analyysiohjeen AHL.2 mukaisesti, jossa:

1. Otetaan 25 g ka. sisältävä massamäärä näytettä ja laimennetaan se alle 1 %:n sakeuteen.
2. Näyte kaadetaan Sommerville rakoseulalle, joka on varustettu 0,15 mm:n rakolevyllä. Massaa lajitellaan niin kauan, että kuidut ovat läpäisseet rakolevyn, ts. noin 20 minuuttia.
3. Rejekti kerätään levyltä suodatinpaperille käyttäen Büchner-suppiloa ja imua apuna ja poistetaan siitä kaikki näkyvät muovinpalaset tms.
4. Suodatinpaperille suodatetun näytteen päälle laitetaan sileä alumiinifolio, kiiltävä puoli alaspäin, ja kuivataan pikakuivaimessa imupapereiden välissä 15 minuuttia.
5. Poistetaan suodatinpaperilla oleva jäännös esim. spaattelilla, jonka jälkeen paperi värjätään käyttämällä tekstiiliväriä.
6. Tahmojen lukumäärä lasketaan Optomax Image Analyzer:lla suodatinpaperista käyttäen seuraavia kokoluokkia: 0,02-0,04, 0,04-0,15, 0,15-0,40, 0,40-1,0, 1-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-50, 50-75, 75-100, 100-150 ja 150-200 mm². Tulos ilmoitetaan kpl/25 g ka, mm²/25 g ka ja mm²/100 g ka

Mikäli Sommerville levyille jäävän jäännöksen määrä on suuri, voidaan se jakaa kahteen osaan ja suodattaa kahdelle paperille.

Pintajännitysmittaukset

Kemikaaliliuosten pintajännitysmittauksia varten valmistettiin 200 ml liuosta, johon annosteltiin kemikaalia samassa suhteessa kuin koeajoissa. Liuosten pH:ksi säädettiin 9,5 ja ne lämmitettiin koeajoissa käytettyyn lämpötilaan 45 °C, jonka jälkeen mitattiin pintajännitykset.

Tämän lisäksi mitattiin massasuodosten pintajännitykset. Nollakokeen syöttövirtauksesta otettu massa lämmitettiin 45 °C:een lämpötilaan, jonka jälkeen siihen annosteltiin siistauskemikaalia yhtä paljon kuin varsinaisissa koeajoissa. Massan pH:ksi säädettiin 9,5 ja sekoitusta jatkettiin puolen tunnin ajan. Tämän jälkeen massaa sentrifugoitii 15 minuuttia käyttäen kierrosnopeutta 3000 rpm. Kiintoaineesta erottunut neste dekantoitii ja sen lämpötilaksi säädettiin vesihautessa 45 °C, jonka jälkeen mitattiin pintajännitys.

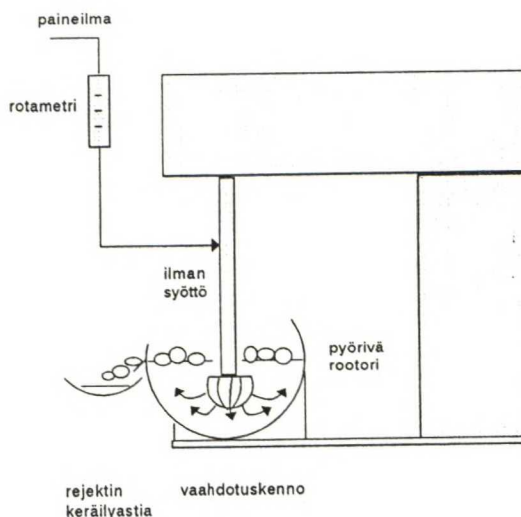
Pintajännitysmittausten jälkeen sentrifugoidut liuokset suodatettiin selluloosanitraatti membraanisuodattimen (0,2 µm) läpi. Suodoksen lämpötila säädettiin vesihautessa 45 °C:een ja sen pintajännitys mitattiin.

Laboratoriovaahdotus Outokumpu-kennolla

Outokummun laboratoriokennon tärkeimmät osat ovat:

- pyörivä roottori, jonka akselin kautta tapahtuu myös ilman syöttö kennoon,
- lieriön muotoinen vaahdotusallas ja
- rejektin keräilyastia.

Kuva Outokummun laboratoriokennosta on esitetty ohessa.



Vaahdotus Outokummun laboratoriokennolla suoritettiin seuraavasti:

1. Sulppunäyte otettiin GSC:n syöttölinjasta samasta kohtaa kuin GSC:n syöttönäyte.
2. Outokumpu-kennossa vaahdotettava määrä oli 4,0 litraa 0,7 %:sta sulppua. Sakeuden säätö suoritettiin lämpimällä vedellä, jolloin sulpun lämpötila saatiin säädettyä samaksi kuin GSC:ssä.
3. Sulpun kovuus säädettiin CaCl_2 :lla samaksi kuin GSC:ssä.
4. Vaahdotuksessa käytetty ilmamäärä säädettiin rotametrillä 7,5 l/min. Roottorin pyörimisnopeus oli 700 rpm.
5. Vaahdotusta jatkettiin oli viisi minuuttia, jonka aikana kennon pinnalle muodostunut vaahto siirrettiin kaapimalla rejektiastian. Määrätyn ajan jälkeen määritettiin syötön, akseptin ja rejektin ISO-vaaleudet sekä rejektin osuus.

Koeajo A

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 47,6
- Tuhkapitoisuus (%): 8,0



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 48,8
- Tuhkapitoisuus (%): 7,4



REJEKTI

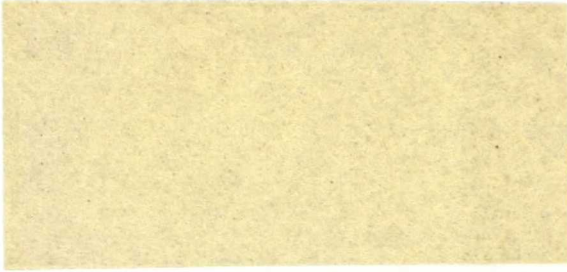
- Vaaleus (ISO): 41,6
- Tuhkapitoisuus (%): 11,5



Koeajo B

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 50,7
- Tuhkapitoisuus (%): 6,0



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 51,7
- Tuhkapitoisuus (%): 5,7



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 45,9
- Tuhkapitoisuus (%): 7,9



Koeajo C

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 48,3
- Tuhkapitoisuus (%): 5,8



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 48,7
- Tuhkapitoisuus (%): 5,6



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 44,0
- Tuhkapitoisuus (%): 7,9



Koeajo D



SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 51,5
- Tuhkapitoisuus (%): 7,8



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 52,3
- Tuhkapitoisuus (%): 7,5



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 47,5
- Tuhkapitoisuus (%): 9,5

Koeajo E

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 51,9
- Tuhkapitoisuus (%): 5,9



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 52,2
- Tuhkapitoisuus (%): 5,7



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 50,6
- Tuhkapitoisuus (%): 6,7



Koeajo F



SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 47,3
- Tuhkapitoisuus (%): 5,9



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 47,6
- Tuhkapitoisuus (%): 5,6



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 44,9
- Tuhkapitoisuus (%): 7,1

Koeajo G

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 51,4
- Tuhkapitoisuus (%): 8,1



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 52,6
- Tuhkapitoisuus (%): 7,4



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 45,3
- Tuhkapitoisuus (%): 12,6



Koeajo H

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 52,0
- Tuhkapitoisuus (%): 5,7



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 52,3
- Tuhkapitoisuus (%): 4,9



REJEKTI

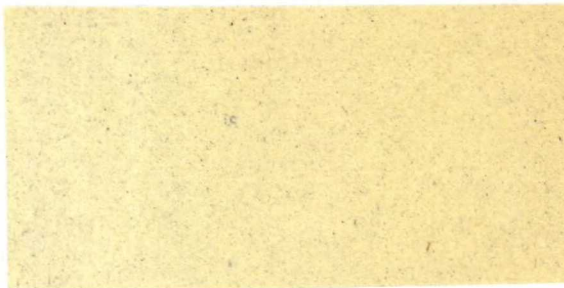
- Vaaleus (ISO): 49,2
- Tuhkapitoisuus (%): 6,9



Koeajo I

SYÖTTÖ

- Vaaleus (ISO): 57,2
- Tuhkapitoisuus (%): 3,6



AKSEPTI

- Vaaleus (ISO): 57,6
- Tuhkapitoisuus (%): 3,4



REJEKTI

- Vaaleus (ISO): 53,9
- Tuhkapitoisuus (%): 4,4



Koeajo 0-koe

SYÖTTÖ



- Vaaleus (ISO): 58,1
- Tuhkapitoisuus (%): 1,6

AKSEPTI



- Vaaleus (ISO): 58,6
- Tuhkapitoisuus (%): 1,6

REJEKTI



- Vaaleus (ISO): 57,5
- Tuhkapitoisuus (%): 1,8

Koeajoista A, B, C ja D saadut tulokset varmuusvälineen.

Varm. väli Vaaleus (ISO)			Tuhkapitoisuus (%)				Kuidunpituus (mm)				Pituudella painotettu				Painolla painotettu				CSF	
	Syöttö	Aksepti	Relekti	Suodoks	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Aksepti	Relekti	Aksepti
A 1	47,6	48,8	41,6	91,2	8,02	7,44	11,46	0,42	0,41	0,38	1,29	1,28	1,19	2,16	2,18	2,09	2,11	2,11	2,09	129
2	47,6	48,5	42,2	91,6	8,02	7,59	11,28	0,42	0,41	0,38	1,28	1,25	1,21	2,14	2,11	2,11	2,14	2,11	2,11	131
3	47,6	48,4	42,5	91,6	8,04	7,45	11,39	0,42	0,42	0,39	1,28	1,27	1,21	2,15	2,12	2,09	2,15	2,12	2,09	135
4	47,8	48,7	42,5	91,7	8,02	7,47	11,43	0,42	0,43	0,39	1,28	1,28	1,24	2,18	2,13	2,16	2,18	2,13	2,16	134
5	47,8	48,8	42,5	91,7	8,03	7,57	11,17	0,41	0,42	0,39	1,26	1,30	1,22	2,15	2,19	2,11	2,15	2,19	2,11	122
Keskiarvo	47,7	48,6	42,3	91,5	8,03	7,50	11,35	0,42	0,42	0,39	1,28	1,28	1,21	2,16	2,15	2,11	2,16	2,15	2,11	130
Varm. väli	0,136	0,226	0,486	0,329	0,011	0,088	0,149	0,006	0,010	0,007	0,014	0,023	0,023	0,019	0,045	0,036	0,019	0,045	0,036	6,424
B 1	50,8	51,7	45,4	91,3	6,00	5,59	8,05	0,41	0,40	0,39	1,22	1,23	1,22	2,03	2,05	2,09	2,03	2,05	2,09	122
2	50,7	51,7	45,9	91,9	5,98	5,66	7,88	0,42	0,42	0,40	1,26	1,24	1,20	2,08	2,07	2,00	2,08	2,07	2,00	131
3	50,8	51,7	46,2	91,9	6,04	5,68	7,87	0,43	0,41	0,39	1,31	1,26	1,22	2,15	2,12	2,08	2,15	2,12	2,08	133
4	50,6	51,1	46,3	91,7	5,87	5,69	7,67	0,42	0,42	0,38	1,28	1,28	1,18	2,12	2,11	2,03	2,12	2,11	2,03	136
5	50,0	50,9	45,9	91,7	5,94	5,63	7,67	0,43	0,43	0,39	1,31	1,31	1,23	2,17	2,14	2,08	2,17	2,14	2,08	136
Keskiarvo	50,6	51,4	45,9	91,6	5,97	5,65	7,83	0,42	0,42	0,39	1,28	1,28	1,21	2,11	2,10	2,06	2,11	2,10	2,06	132
Varm. väli	0,416	0,485	0,436	0,380	0,080	0,051	0,200	0,010	0,014	0,009	0,047	0,040	0,025	0,070	0,046	0,049	0,070	0,046	0,049	7,174
C 1	48,4	48,5	43,9	88,7	5,77	5,65	7,85	0,39	0,39	0,36	1,23	1,25	1,16	2,13	2,13	2,07	2,13	2,13	2,07	135
2	48,3	48,6	44,1	88,9	6,93	5,67	7,66	0,39	0,39	0,36	1,25	1,26	1,16	2,16	2,20	2,06	2,16	2,20	2,06	135
3	48,6	48,7	44,1	88,9	6,90	5,82	7,89	0,40	0,39	0,37	1,26	1,27	1,19	2,13	2,21	2,09	2,13	2,21	2,09	140
4	48,3	48,7	44,0	90,9	5,84	5,64	7,86	0,39	0,39	0,36	1,25	1,25	1,18	2,15	2,17	2,12	2,15	2,17	2,12	121
5	48,3	48,4	43,4	90,9	5,96	5,71	7,84	0,40	0,40	0,37	1,28	1,29	1,23	2,21	2,21	2,17	2,21	2,21	2,17	124
Keskiarvo	48,4	48,6	43,9	89,5	6,28	5,70	7,82	0,39	0,39	0,36	1,25	1,25	1,18	2,16	2,20	2,10	2,16	2,20	2,10	131
Varm. väli	0,162	0,162	0,362	1,512	0,726	0,091	0,114	0,007	0,006	0,007	0,023	0,021	0,036	0,041	0,021	0,055	0,041	0,021	0,055	10,062
D 1	51,0	51,8	46,8	86,6	7,70	7,34	9,82	0,41	0,43	0,40	1,26	1,32	1,26	2,13	2,24	2,16	2,13	2,24	2,16	128
2	51,4	51,7	46,9	87,8	7,63	7,31	9,37	0,43	0,43	0,39	1,29	1,31	1,22	2,15	2,17	2,10	2,15	2,17	2,10	133
3	51,2	51,9	46,8	87,8	7,76	7,59	9,80	0,42	0,43	0,39	1,30	1,30	1,21	2,18	2,15	2,08	2,18	2,15	2,08	122
4	51,5	52,3	47,5	87,7	7,79	7,45	9,51	0,42	0,41	0,39	1,29	1,25	1,21	2,12	2,11	2,09	2,12	2,11	2,09	118
5	51,6	52,4	47,3	87,7	7,80	7,79	9,49	0,42	0,43	0,39	1,30	1,33	1,24	2,18	2,20	2,15	2,18	2,20	2,15	118
Keskiarvo	51,3	52,0	47,1	87,4	7,74	7,50	9,60	0,42	0,43	0,39	1,29	1,30	1,23	2,15	2,17	2,12	2,15	2,17	2,12	124
Varm. väli	0,299	0,387	0,399	0,828	0,088	0,246	0,250	0,009	0,011	0,006	0,020	0,039	0,027	0,034	0,061	0,045	0,034	0,061	0,045	8,171

Koeajoista E, F ja G saadut tulokset varmuusväleineen.

Varm. väli +/- 5 %	Vaaleus (ISO)				Tuhkapitoisuus (%)				Kuidunpituus (mm) Keskiarvo				Pituudella painotettu				Painolla painotettu				CSF
	Syöttö	Aksepti	Relekti	Suodos	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Syöttö	Aksepti	Relekti	Syöttö	Syöttö	Aksepti	Relekti		
E 1	51,3	51,3	50,0	86,1	5,86	5,84	6,74	0,44	0,44	0,44	0,42	1,31	1,29	1,29	2,14	2,14	2,17	122			
	2	51,4	51,2	49,5	5,87	5,83	6,64	0,43	0,43	0,45	0,43	1,26	1,32	1,29	2,07	2,18	2,14	122			
	3	51,5	51,2	50,0	86,0	5,95	5,88	6,82	0,44	0,43	0,43	1,30	1,29	1,31	2,16	2,14	2,19	128			
	4	51,9	52,2	50,6		5,90	5,65	6,86	0,44	0,44	0,41	1,32	1,32	1,25	2,18	2,18	2,09	118			
	5	51,4	51,6	50,4	86,6	5,63	5,67	6,82	0,44	0,46	0,46	1,31	1,35	1,33	2,17	2,18	2,21	118			
Keskiarvo	51,5	51,5	50,1	86,2	5,84	5,77	6,78	0,44	0,44	0,44	0,43	1,30	1,31	1,29	2,14	2,16	2,16	122			
Varm. väli	0,292	0,527	0,527	0,400	0,154	0,132	0,109	0,006	0,014	0,014	0,014	0,029	0,031	0,037	0,055	0,027	0,058	5,096			
F 1	47,3	47,6	44,9	84,2	5,88	5,59	7,11	0,39	0,38	0,38	0,37	1,29	1,27	1,24	2,22	2,22	2,17	128			
	2	47,6	47,6	44,9	5,94	5,73	7,39	0,39	0,40	0,39	0,37	1,28	1,33	1,20	2,18	2,29	2,14	122			
	3	47,4	47,7	44,4	85,9	5,63	5,63	7,54	0,40	0,39	0,36	1,31	1,28	1,22	2,22	2,20	2,18	126			
	4	47,5	47,7	45,4		5,87	5,73	7,13	0,40	0,39	0,39	1,28	1,25	1,21	2,19	2,17	2,16	126			
	5	47,7	47,9	45,1	86,6	6,07	5,73	7,40	0,38	0,38	0,39	1,24	1,30	1,23	2,16	2,22	2,18	132			
Keskiarvo	47,5	47,7	44,9	85,6	5,88	5,68	7,31	0,39	0,39	0,39	0,36	1,28	1,29	1,22	2,19	2,22	2,17	127			
Varm. väli	0,197	0,152	0,453	1,534	0,199	0,084	0,232	0,010	0,009	0,009	0,007	0,032	0,038	0,020	0,032	0,055	0,021	4,517			
G 1	51,3	51,8	43,6	91,0	8,37	7,72	13,80	0,40	0,40	0,40	0,37	1,23	1,25	1,18	2,10	2,15	2,06	127			
	2	51,2	51,8	44,3	8,25	7,59	13,11	0,41	0,41	0,41	0,38	1,27	1,30	1,20	2,17	2,19	2,08	120			
	3	51,2	52,0	44,9	90,3	8,18	7,67	12,88	0,39	0,43	0,43	1,30	1,34	1,28	2,22	2,24	2,18	117			
	4	51,4	52,6	45,3		8,11	7,41	12,57	0,41	0,44	0,44	1,28	1,37	1,22	2,16	2,30	2,11	119			
	5	51,7	52,4	45,8	90,2	8,13	7,43	12,30	0,43	0,43	0,43	1,33	1,32	1,28	2,23	2,21	2,20	120			
Keskiarvo	51,4	52,1	44,8	90,5	8,21	7,56	12,93	0,41	0,42	0,42	0,38	1,28	1,32	1,23	2,18	2,22	2,13	121			
Varm. väli	0,258	0,452	1,067	0,542	0,131	0,174	0,714	0,018	0,020	0,020	0,014	0,046	0,056	0,057	0,065	0,070	0,076	4,701			

Koeajoista H, I ja nollakokeesta saadut tulokset varmuusvälineen.

Varm. väli Vaaleus (ISO)				Tuhkapitoisuus (%)				Kuidunpituus (mm)				Pituudella painotettu				Painolla painotettu				CSF	
+/- 5 %				Suodas				Keskiarvo				Keskiaarvo				Keskiaarvo				Keskiaarvo	
Syöttö	Aksepti	Rejekt	Suodas	Syöttö	Aksepti	Rejekt	Suodas	Syöttö	Aksepti	Rejekt	Suodas	Syöttö	Aksepti	Rejekt	Suodas	Syöttö	Aksepti	Rejekt	Suodas	Syöttö	Aksepti
H 1	52,4	52,4	48,9	80,7	6,48	5,27	7,05	0,45	0,42	0,39	1,32	1,29	1,23	2,17	2,16	2,11	113				
2	52,0	52,3	48,9		5,35	5,33	6,91	0,42	0,41	0,39	1,34	1,29	1,25	2,23	2,16	2,13	114				
3	52,0	52,2	49,1	80,0	5,54	5,20	6,78	0,41	0,44	0,40	1,29	1,32	1,23	2,19	2,19	2,09	113				
4	52,1	52,4	49,2		5,64	6,19 (nitti)	6,74	0,43	0,43	0,39	1,29	1,31	1,24	2,17	2,18	2,14	120				
5	52,0	52,3	49,2	80,9	5,65	4,86	6,91	0,44	0,42	0,40	1,34	1,27	* 1,28	2,23	2,13	2,17	114				
Keskiarvo	52,1	52,3	49,1	80,5	5,73	5,17	6,88	0,43	0,42	0,39	1,32	1,30	1,25	2,20	2,16	2,13	115				
Varm. väli	0,215	0,104	0,189	0,588	0,541	2,881	0,153	0,020	0,014	0,007	0,031	0,024	0,026	0,038	0,029	0,038	3,667				
I 1	57,2	57,5	54,3	78,6	3,53	3,38	4,46	0,44	0,41	0,38	1,36	1,28	1,21	2,22	2,18	2,12	110				
2	57,3	57,5	54,2		3,47	3,34	4,25	0,40	0,40	0,38	1,27	1,31	1,23	2,17	2,23	2,13	96				
3	57,2	57,6	54,3	76,3	3,60	3,36	4,42	0,39	0,40	0,36	1,27	1,26	1,17	2,17	2,16	2,08	115				
4	57,2	57,5	53,9		3,40	3,29	4,38	0,41	0,39	0,36	1,31	1,26	1,16	2,22	2,17	2,07	111				
5	57,2	57,5	54,3	75,0	3,41	3,36	4,43	0,43	0,43	0,39	1,34	1,34	1,29	2,25	2,21	2,20	115				
Keskiarvo	57,2	57,5	54,2	76,6	3,48	3,35	4,39	0,41	0,41	0,37	1,31	1,29	1,21	2,21	2,19	2,12	109				
Varm. väli	0,056	0,056	0,215	2,286	0,105	0,043	0,102	0,026	0,019	0,017	0,051	0,043	0,065	0,044	0,036	0,064	9,734				
0-koe 1	58,5	58,6	57,3	78,7	1,58	1,58	1,73	0,40	0,38	0,36	1,32	1,27	1,21	2,29	2,22	2,12	106				
2	58,1	58,6	57,5	78,9	1,59	1,56	1,78	0,38	0,37	0,37	1,26	1,28	1,22	2,15	2,23	2,11	117				
3	58,4	58,4	57,4	77,7	1,58	1,52	1,77	0,39	0,40	0,37	1,30	1,30	1,22	2,24	2,21	2,13	104				
Keskiarvo	58,3	58,5	57,4	78,4	1,58	1,55	1,76	0,39	0,38	0,37	1,29	1,28	1,22	2,23	2,22	2,12	109				
Varm. väli	0,334	0,185	0,161	1,032	0,009	0,049	0,042	0,016	0,025	0,009	0,049	0,025	0,009	0,114	0,016	0,016	11,235				

Kumulatiivinen kuldunpituusjakauma																					
Varm. väli +/- 5 %		0,00–0,20 0,20–0,40 0,40–0,60 0,60–0,80 0,80–1,00 1,00–1,20 1,20–1,40 1,40–1,60 1,60–1,80 1,80–2,00 2,00–2,20 2,20–2,40 2,40–2,60 2,60–2,80 2,80–3,00 3,00–3,20 3,20–3,40 3,40–3,60 3,60–3,80 3,80–4,00																			
Syöttö A	1	9,70	22,61	32,90	42,05	50,32	57,50	62,88	67,72	72,02	76,12	79,75	83,17	86,63	88,93	91,32	93,21	95,02	96,42	97,26	98,06
	2	9,63	22,56	33,04	42,01	50,49	58,02	63,45	68,04	72,41	76,25	79,92	82,82	86,12	89,42	91,54	93,78	95,38	96,41	97,07	97,96
	3	9,52	22,27	32,75	42,11	50,55	57,84	63,33	68,06	72,11	75,91	79,43	83,05	86,37	88,99	91,14	93,31	95,20	96,33	97,37	98,27
	4	9,92	22,98	33,44	42,60	51,10	58,44	63,90	68,56	72,86	76,77	80,28	83,52	86,21	88,70	91,21	93,01	94,65	96,14	97,12	97,91
	5	10,19	23,44	33,90	43,52	52,24	58,99	64,22	68,87	72,89	76,66	80,15	83,34	86,50	89,13	91,68	93,50	95,13	96,22	97,25	98,02
Keskiarvo		9,79	22,77	33,21	42,50	50,94	58,16	63,56	68,25	72,46	76,34	79,89	83,18	86,37	89,03	91,38	93,36	95,12	96,30	97,21	98,04
Varm. väli		0,331	0,560	0,578	0,816	0,974	0,716	0,646	0,570	0,506	0,452	0,420	0,333	0,258	0,330	0,282	0,364	0,246	0,151	0,149	0,172
Aksepti A	1	9,85	22,90	33,21	42,52	50,64	57,45	63,20	68,05	72,63	76,68	79,97	83,09	86,35	88,89	91,37	93,31	94,98	96,28	97,13	98,20
	2	10,21	23,39	33,95	43,33	51,58	58,63	64,36	69,35	73,63	77,46	81,10	84,29	87,25	89,86	91,79	93,83	95,19	96,39	97,33	98,23
	3	9,83	22,67	33,15	42,26	50,90	57,70	62,97	67,68	72,17	76,33	80,21	83,65	86,74	89,24	91,28	93,66	95,59	96,91	97,78	98,59
	4	9,41	22,32	32,73	41,84	50,20	57,69	63,54	67,88	72,41	76,95	80,44	83,83	86,79	89,21	91,67	93,43	95,13	96,50	97,25	98,11
	5	9,44	22,20	32,72	41,84	50,26	57,09	62,64	67,50	71,80	75,55	78,97	82,32	85,66	88,21	90,76	92,86	94,49	96,00	97,27	98,11
Keskiarvo		9,75	22,70	33,15	42,36	50,71	57,75	63,34	68,09	72,53	76,59	80,14	83,44	86,56	89,08	91,37	93,44	95,08	96,42	97,35	98,24
Varm. väli		0,412	0,593	0,623	0,766	0,988	0,810	0,817	0,911	0,856	0,889	0,966	0,942	0,740	0,747	0,500	0,416	0,494	0,414	0,311	0,259
Relekti A	1	11,27	25,50	36,52	46,24	54,65	61,59	67,03	71,55	75,43	79,19	82,13	85,28	88,02	90,39	92,41	94,14	95,43	96,41	97,30	98,13
	2	11,04	25,03	35,94	45,52	53,67	60,71	66,18	70,52	74,98	78,66	82,02	85,15	87,76	90,08	92,14	93,84	95,15	96,43	97,58	98,23
	3	10,96	24,63	35,54	44,85	53,37	60,53	66,14	70,81	75,18	79,11	82,03	85,04	87,67	90,13	92,40	94,00	95,49	96,81	97,79	98,54
	4	10,87	24,68	35,25	44,23	52,82	59,76	65,16	69,65	73,89	77,21	80,42	83,75	86,59	89,32	91,24	93,27	94,92	96,20	97,18	98,11
	5	10,82	24,38	35,36	44,86	53,57	60,96	66,19	70,49	74,78	78,49	81,40	85,04	87,92	90,37	92,31	94,08	95,22	96,53	97,50	98,27
Keskiarvo		10,99	24,84	35,72	45,14	53,62	60,71	66,14	70,60	74,85	78,53	81,60	84,85	87,59	90,06	92,10	93,87	95,24	96,48	97,47	98,26
Varm. väli		0,220	0,539	0,643	0,952	0,827	0,830	0,824	0,849	0,733	0,989	0,895	0,776	0,717	0,541	0,613	0,437	0,285	0,276	0,297	0,214
Kumulatiivinen kuldunpituusjakauma																					
Varm. väli +/- 5 %		0,00–0,20 0,20–0,40 0,40–0,60 0,60–0,80 0,80–1,00 1,00–1,20 1,20–1,40 1,40–1,60 1,60–1,80 1,80–2,00 2,00–2,20 2,20–2,40 2,40–2,60 2,60–2,80 2,80–3,00 3,00–3,20 3,20–3,40 3,40–3,60 3,60–3,80 3,80–4,00																			
Syöttö B	1	10,15	23,40	33,96	43,60	51,95	59,16	65,10	69,84	74,79	78,61	81,94	85,45	88,27	91,32	93,32	94,93	96,35	97,53	98,22	98,77
	2	9,79	22,46	32,58	41,97	50,30	57,53	62,79	66,09	70,06	73,06	76,19	81,31	84,78	88,14	90,61	92,84	94,57	95,97	97,16	98,52
	3	9,40	21,57	31,39	40,25	48,58	55,49	61,03	66,63	71,39	75,83	79,83	83,19	86,37	88,90	91,50	93,48	95,18	96,46	97,45	98,37
	4	9,44	22,01	31,96	41,16	49,62	56,75	62,62	67,74	72,64	76,74	80,58	84,07	87,70	90,28	92,38	94,01	95,43	96,57	97,48	98,09
	5	9,39	21,84	31,71	40,33	48,82	55,74	61,22	66,08	71,18	75,17	79,39	82,75	85,80	88,84	91,62	93,54	94,96	96,04	97,27	98,09
Keskiarvo		9,63	22,26	32,32	41,46	49,85	56,93	62,55	67,68	72,61	76,73	80,61	84,05	87,26	89,99	92,33	94,11	95,58	96,75	97,65	98,39
Varm. väli		0,414	0,891	1,262	1,722	1,684	1,950	2,028	1,812	1,811	1,623	1,297	1,379	1,378	1,355	0,970	0,790	0,712	0,735	0,476	0,333
Aksepti B	1	10,12	23,25	33,88	43,22	51,51	58,56	64,49	69,49	73,95	78,43	82,23	85,53	88,43	90,91	92,95	94,63	96,12	97,40	98,40	98,96
	2	9,20	22,60	33,34	42,63	51,41	58,48	64,64	69,86	74,30	78,57	81,97	85,17	87,99	90,28	92,69	94,39	95,92	96,88	97,68	98,44
	3	9,98	22,77	32,98	42,01	50,43	57,56	63,43	68,71	73,45	77,52	81,11	84,57	87,37	90,02	92,08	93,94	95,45	96,51	97,42	98,32
	4	9,37	21,74	32,08	41,23	49,58	56,52	62,26	67,65	72,43	76,73	80,16	83,67	87,18	89,84	92,07	94,09	95,81	96,65	97,83	98,62
	5	9,40	21,54	31,71	40,33	48,43	54,93	61,13	66,12	71,20	75,65	80,05	83,18	86,75	89,56	91,88	93,78	95,49	96,78	97,72	98,51
Keskiarvo		9,62	22,38	32,71	41,82	50,27	57,21	63,19	68,37	73,07	77,38	81,10	84,42	87,54	90,12	92,33	94,17	95,76	96,88	97,81	98,57
Varm. väli		0,510	0,895	1,300	1,548	1,812	1,889	1,861	1,883	1,585	1,517	1,246	1,230	0,829	0,637	0,572	0,427	0,355	0,402	0,451	0,303
Relekti B	1	10,81	24,39	35,05	44,39	52,94	59,80	65,67	70,28	74,90	78,65	82,23	84,72	87,74	89,99	92,18	93,97	95,96	96,96	97,86	98,50
	2	10,35	23,92	34,55	43,84	52,41	59,70	65,21	70,59	75,22	78,78	82,27	85,91	88,85	91,36	93,53	95,16	96,65	97,53	98,38	98,96
	3	10,71	24,41	35,15	44,53	53,13	59,82	65,22	70,22	74,55	78,40	81,75	85,06	87,91	90,29	92,37	94,13	95,53	96,66	97,94	98,42
	4	11,09	24,81	35,98	45,67	54,51	61,01	67,01	72,17	76,83	80,21	83,41	86,45	89,16	91,46	93,25	95,00	96,20	97,19	97,81	98,50
	5	10,66	24,04	34,52	43,59	52,01	58,96	64,46	69,96	73,69	76,09	82,01	85,25	88,14	90,61	92,84	94,49	95,70	96,60	97,79	98,51
Keskiarvo		10,72	24,31	35,05	44,40	53,00	59,96	65,51	70,44	75,00	78,87	82,33	85,48	88,36	90,74	92,83	94,55	96,01	97,07	97,98	98,58
Varm. väli		0,332	0,436	0,737	1,002	1,184	1,165	1,172	1,428	1,338	1,009	0,791	0,864	0,765	0,807	0,709	0,649	0,547	0,370	0,303	0,269

Kumulatiivinen kuldipuhituslaskama		Varm. väli +/- 5 %																			
		0,00–0,20	0,20–0,40	0,40–0,60	0,60–0,80	0,80–1,00	1,00–1,20	1,20–1,40	1,40–1,60	1,60–1,80	1,80–2,00	2,00–2,20	2,20–2,40	2,40–2,60	2,60–2,80	2,80–3,00	3,00–3,20	3,20–3,40	3,40–3,60	3,60–3,80	3,80–4,00
Syötös G 1	1	10,73	24,73	35,44	44,78	53,07	59,53	64,67	69,23	73,49	77,53	81,35	84,51	87,38	89,73	91,94	93,74	95,39	96,64	97,71	98,49
	2	10,52	23,93	33,93	43,03	51,01	57,84	63,52	68,46	72,93	77,11	80,48	83,84	86,63	89,17	91,30	93,34	94,84	96,05	97,09	97,82
	3	10,94	23,68	34,07	42,70	50,61	57,13	62,90	67,55	71,84	76,12	79,11	82,29	85,15	88,14	90,29	92,39	94,15	95,61	97,08	97,92
	4	10,54	23,92	33,90	42,82	50,71	57,42	62,86	67,51	72,24	76,00	79,50	83,21	86,55	89,74	91,13	93,32	95,02	96,43	97,58	98,23
	5	9,72	22,20	32,09	40,67	48,65	55,60	60,73	65,91	70,71	74,42	78,22	81,77	85,04	87,77	90,22	92,02	94,23	95,78	97,10	97,92
Keskiarvo		10,49	23,63	33,89	42,80	50,81	57,50	62,94	67,74	72,24	76,24	79,73	83,12	86,15	88,71	90,98	92,96	94,73	96,14	97,31	98,10
	Varm. väli	0,575	1,137	1,481	1,615	1,952	1,757	1,782	1,543	1,324	1,498	1,510	1,366	1,264	0,975	0,901	0,899	0,657	0,474	0,382	0,321
Aksepti G 1	1	10,60	24,19	34,88	43,92	51,84	58,65	64,39	69,17	73,40	77,07	80,42	83,51	86,89	89,36	91,37	93,30	94,99	96,52	97,47	98,26
	2	10,39	23,22	33,21	42,19	50,01	56,67	61,75	66,26	71,36	75,56	78,82	82,05	85,47	88,29	91,02	92,89	94,64	96,29	97,17	98,14
	3	9,77	22,23	32,26	40,93	48,68	55,44	60,85	65,76	70,11	74,11	77,81	81,47	84,48	87,14	90,14	92,42	94,16	95,67	97,04	97,92
	4	9,52	21,77	31,40	39,80	47,99	54,54	59,99	65,15	69,40	73,45	76,94	80,50	83,81	86,63	89,09	91,58	93,49	95,10	96,54	97,58
	5	9,48	22,24	32,11	41,02	49,31	55,90	61,21	66,22	70,88	74,96	78,65	82,13	85,03	87,69	90,35	92,49	94,42	95,73	96,90	97,88
Keskiarvo		9,95	22,73	32,77	41,57	49,57	56,20	61,64	66,51	71,03	75,03	78,53	81,93	85,14	87,98	90,39	92,54	94,34	95,96	97,02	97,86
	Varm. väli	0,638	1,209	1,670	1,941	1,834	1,929	2,072	1,929	1,691	1,735	1,611	1,363	1,443	1,172	1,096	0,796	0,702	0,695	0,426	0,326
Relekti G 1	1	11,94	26,59	37,52	46,77	54,59	61,02	66,60	71,50	75,53	78,94	82,71	85,81	88,63	90,71	92,64	94,18	95,65	96,99	97,85	98,55
	2	11,86	26,20	36,87	45,96	53,73	60,15	65,72	70,42	74,87	78,69	81,93	85,05	87,67	90,38	92,42	94,43	95,86	96,96	97,95	98,53
	3	10,85	24,41	34,29	43,03	50,85	57,17	62,50	67,32	71,92	76,01	79,57	82,63	85,67	88,51	90,79	93,18	94,81	96,28	97,29	97,89
	4	11,66	25,62	35,99	45,06	52,89	59,72	65,19	69,63	74,21	78,08	81,53	84,65	87,76	90,22	92,36	93,92	95,30	96,65	97,62	98,37
	5	10,88	24,26	34,32	43,25	51,22	57,61	62,72	67,43	72,20	75,93	79,35	82,65	86,03	88,39	90,84	92,73	94,44	95,82	97,01	98,04
Keskiarvo		11,44	25,42	35,80	44,81	52,66	59,17	64,55	69,26	73,75	77,53	81,02	84,22	87,15	89,64	91,81	93,67	95,21	96,50	97,54	98,28
	Varm. väli	0,663	1,301	1,824	2,046	1,992	2,018	2,287	2,294	2,003	1,814	1,848	1,706	1,558	1,372	1,137	0,876	0,729	0,708	0,487	0,369

Kumulatiivinen kuldipuhituslaskama		Varm. väli +/- 5 %																			
		0,00–0,20	0,20–0,40	0,40–0,60	0,60–0,80	0,80–1,00	1,00–1,20	1,20–1,40	1,40–1,60	1,60–1,80	1,80–2,00	2,00–2,20	2,20–2,40	2,40–2,60	2,60–2,80	2,80–3,00	3,00–3,20	3,20–3,40	3,40–3,60	3,60–3,80	3,80–4,00
Syötös H 1	1	9,06	21,20	31,21	39,86	48,21	55,00	61,10	65,95	70,43	74,70	78,44	82,42	85,94	89,07	91,52	93,63	94,81	96,25	97,14	98,53
	2	9,72	22,42	32,18	40,82	48,73	55,27	60,70	65,52	69,92	73,92	77,45	81,49	85,06	87,37	89,85	92,20	94,04	95,55	96,99	97,94
	3	10,47	23,42	33,72	42,59	50,77	57,13	62,58	67,94	72,61	76,77	79,88	82,74	86,08	88,50	90,81	92,88	95,00	96,14	97,12	98,00
	4	9,97	22,88	32,83	41,74	49,90	56,98	62,53	67,28	72,00	76,15	79,74	82,95	86,06	89,08	91,12	93,13	94,93	96,22	97,19	98,14
	5	9,65	22,09	31,96	40,57	48,29	54,82	60,38	65,25	69,94	74,31	77,94	81,54	85,02	87,88	90,42	92,59	94,48	95,98	97,17	97,90
Keskiarvo		9,77	22,40	32,38	41,12	49,18	55,84	61,48	66,39	70,98	75,17	78,69	82,23	85,63	88,38	90,72	92,99	94,65	96,03	97,12	98,10
	Varm. väli	0,637	1,042	1,177	1,322	1,367	1,395	1,285	1,450	1,548	1,528	1,345	0,843	0,675	0,833	0,760	0,673	0,492	0,357	0,098	0,318
Aksepti H 1	1	9,88	22,57	32,95	41,68	50,07	56,98	62,23	67,07	71,37	75,36	79,14	82,66	86,02	88,98	91,16	93,25	95,09	96,23	97,30	98,21
	2	9,71	22,73	32,87	41,96	49,96	57,29	62,94	67,67	71,97	75,74	79,19	82,68	85,89	88,75	91,63	93,53	95,01	96,51	97,68	98,35
	3	9,50	22,00	31,80	40,27	48,81	55,72	61,11	66,41	70,81	75,00	78,27	82,06	85,15	88,12	90,80	93,02	94,90	96,29	97,07	97,95
	4	9,70	21,89	32,00	41,09	49,05	56,16	61,89	68,40	70,91	74,84	78,78	82,38	85,48	88,07	90,58	92,57	94,95	96,53	97,49	98,35
	5	10,32	23,45	33,57	41,99	50,35	57,17	63,05	67,99	72,42	76,35	79,72	83,09	86,41	89,12	91,80	93,67	95,12	96,41	97,56	98,50
Keskiarvo		9,82	22,53	32,64	41,40	49,61	56,66	62,24	67,11	71,50	75,46	79,02	82,61	85,79	88,61	91,15	93,21	95,01	96,39	97,42	98,27
	Varm. väli	0,384	0,781	0,907	0,904	0,921	0,855	0,992	0,897	0,859	0,755	0,668	0,502	0,607	0,605	0,583	0,542	0,115	0,164	0,297	0,258
Relekti H 1	1	10,92	24,65	35,36	44,24	52,45	59,72	65,16	69,90	73,97	78,05	80,95	84,10	87,10	89,48	91,94	94,09	95,61	96,67	97,85	98,43
	2	10,78	24,40	34,50	43,50	51,78	59,00	64,42	69,14	73,23	76,81	80,01	83,28	86,48	89,26	91,78	93,67	95,57	96,56	97,73	98,36
	3	11,04	24,81	35,11	44,21	52,68	59,51	64,89	69,50	73,89	77,42	80,68	84,03	87,27	90,28	92,42	94,37	95,87	97,16	98,06	98,74
	4	11,24	25,42	35,64	44,64	52,84	59,63	64,68	69,20	73,97	77,14	80,22	83,43	86,33	89,69	91,92	93,61	95,63	96,66	97,70	98,39
	5	10,87	24,08	34,09	42,63	50,86	57,35	62,77	67,77	72,18	76,31	79,97	83,12	85,87	88,44	91,04	92,97	94,84	96,03	97,43	98,43
Keskiarvo		10,96	24,63	34,98	43,85	52,08	58,98	64,38	69,10	73,25	77,11	80,37	83,59	86,61	89,43	91,82	93,78	95,50	96,82	97,75	98,47
	Varm. väli	0,218	0,615	0,862	0,989	0,981	1,181	1,172	0,989	0,912	0,850	0,536	0,555	0,714	0,834	0,620	0,663	0,484	0,500	0,286	0,191

Kumulatiivinen kuudumpituisajakauma		Varm. väli +/- 5 %																			
		0,00–0,20	0,20–0,40	0,40–0,60	0,60–0,80	0,80–1,00	1,00–1,20	1,20–1,40	1,40–1,60	1,60–1,80	1,80–2,00	2,00–2,20	2,20–2,40	2,40–2,60	2,60–2,80	2,80–3,00	3,00–3,20	3,20–3,40	3,40–3,60	3,60–3,80	3,80–4,00
Syötiä 1	1	9,20	21,53	31,29	39,86	47,52	53,66	59,22	64,24	68,63	73,18	76,60	80,02	84,05	87,50	90,32	92,84	94,50	96,02	97,25	98,12
	2	10,76	24,52	34,70	43,44	51,11	57,63	62,86	67,71	72,35	76,18	79,67	82,89	85,77	89,08	91,30	93,09	94,69	96,09	97,29	98,28
	3	10,87	24,68	35,15	43,65	51,25	57,71	62,71	67,65	72,31	75,96	79,52	83,08	86,25	89,03	91,34	93,38	95,14	96,46	97,31	98,10
	4	10,76	24,29	34,08	42,32	49,99	56,32	60,81	65,98	70,62	74,82	78,49	82,18	85,19	88,25	90,73	92,51	94,43	95,97	97,22	98,10
	5	10,01	22,72	32,59	40,91	48,45	54,64	60,26	65,46	70,22	73,94	77,81	80,94	84,54	87,41	90,24	92,47	93,79	95,48	96,78	97,64
Keskiarvo		10,32	23,55	33,56	42,04	49,66	55,99	61,17	66,21	70,79	74,90	78,38	81,82	85,18	88,25	90,79	92,82	94,51	96,00	97,17	98,05
Varm. väli		0,892	1,706	1,985	2,030	2,041	2,242	1,965	1,846	1,890	1,621	1,613	1,630	1,108	0,996	0,649	0,496	0,607	0,436	0,275	0,289
Akepti 1	1	10,41	23,87	34,26	43,10	50,73	57,06	62,89	67,69	72,00	75,91	79,25	82,71	85,94	89,67	90,93	93,05	94,83	96,19	97,21	98,21
	2	10,90	24,70	34,53	42,66	49,94	56,14	60,93	65,86	70,45	74,44	77,99	81,76	85,13	87,66	90,20	92,31	94,27	96,11	97,21	98,33
	3	10,88	24,82	35,17	43,68	51,37	57,43	62,80	67,56	72,31	76,73	80,27	83,59	86,70	89,11	91,37	93,14	94,66	96,05	97,28	98,43
	4	11,27	24,98	35,25	44,23	52,11	58,39	63,78	68,31	73,08	76,96	80,37	83,82	86,50	89,90	91,18	92,99	94,55	96,14	97,18	97,98
	5	9,75	22,50	32,23	40,51	47,57	53,95	59,51	64,24	69,11	73,39	77,59	81,54	85,00	88,23	90,54	93,05	94,66	95,98	97,20	98,12
Keskiarvo		10,64	24,17	34,29	42,84	50,34	56,59	61,98	66,73	71,39	75,49	79,09	82,68	85,85	88,55	90,84	92,91	94,65	96,09	97,21	98,21
Varm. väli		0,727	1,280	1,522	1,776	2,169	2,093	2,148	2,068	1,981	1,905	1,587	1,285	0,962	0,631	0,591	0,421	0,331	0,110	0,054	0,219
Relekti 1	1	11,77	26,22	36,91	45,82	53,48	59,91	65,37	70,18	73,86	77,95	81,30	84,60	87,51	89,82	92,01	93,87	95,41	96,77	97,72	98,29
	2	11,37	25,73	36,54	45,25	52,84	59,37	64,71	69,59	74,09	77,72	81,27	84,23	87,19	89,55	91,53	93,57	95,11	96,47	97,51	98,17
	3	12,92	28,21	39,07	47,88	55,52	61,85	66,78	71,34	75,70	79,58	82,62	85,51	88,22	90,79	92,56	94,41	95,76	97,06	97,82	98,42
	4	12,86	27,91	39,10	47,99	55,63	62,01	67,16	71,59	75,45	79,07	82,05	85,42	88,50	90,91	93,03	94,64	96,00	97,23	97,83	98,54
	5	11,36	25,10	35,01	43,19	51,10	57,13	62,04	66,83	71,20	75,27	78,74	82,17	85,56	88,07	90,82	92,77	94,53	96,15	97,19	98,01
Keskiarvo		12,06	26,63	37,33	46,03	53,71	60,05	65,21	69,91	74,06	77,92	81,20	84,39	87,40	89,83	91,99	93,81	95,36	96,74	97,61	98,29
Varm. väli		0,969	1,697	2,184	2,485	2,374	2,493	2,532	2,369	2,228	2,075	1,845	1,681	1,434	1,426	1,074	0,924	0,715	0,543	0,335	0,258
Kumulatiivinen kuudumpituisajakauma		Varm. väli +/- 5 %																			
		0,00–0,20	0,20–0,40	0,40–0,60	0,60–0,80	0,80–1,00	1,00–1,20	1,20–1,40	1,40–1,60	1,60–1,80	1,80–2,00	2,00–2,20	2,20–2,40	2,40–2,60	2,60–2,80	2,80–3,00	3,00–3,20	3,20–3,40	3,40–3,60	3,60–3,80	3,80–4,00
0–Koe	Syötiä 1	11,17	24,72	34,40	42,76	50,50	56,70	62,11	66,83	71,04	74,95	78,37	81,58	85,02	87,69	89,85	91,88	93,90	95,24	96,46	97,45
	2	11,68	25,49	35,54	43,84	51,15	57,44	62,63	67,65	72,21	76,62	80,27	84,14	86,75	89,56	91,31	93,22	94,98	96,18	97,59	98,16
	3	10,95	24,57	34,84	43,28	50,82	56,57	61,34	65,98	70,78	75,24	78,91	82,18	85,42	88,32	90,73	92,74	94,52	95,82	96,97	97,92
Keskiarvo	Varm. väli	11,27	24,93	34,93	43,29	50,76	56,90	62,03	66,82	71,34	75,60	79,18	82,63	85,73	88,52	90,63	92,55	94,43	95,75	97,01	97,84
		0,601	0,792	0,923	0,867	0,555	0,753	1,042	1,340	1,223	1,432	1,571	2,149	1,454	1,527	1,180	1,285	0,796	0,761	0,908	0,560
Akepti 1	1	11,94	25,76	36,00	44,38	51,81	57,88	62,68	67,24	71,62	75,79	79,34	82,71	85,88	88,34	90,45	92,80	94,94	96,17	97,08	97,73
	2	11,56	25,67	35,85	44,50	51,81	58,05	63,14	67,33	71,57	75,35	78,96	82,32	85,72	88,18	90,51	92,95	94,65	96,11	97,16	97,82
	3	10,79	24,28	34,42	42,73	50,10	56,51	61,83	66,73	71,36	75,36	79,07	82,59	85,53	88,34	91,06	92,96	94,57	95,90	97,03	97,97
Keskiarvo	Varm. väli	11,61	25,52	35,84	44,20	51,58	57,72	62,81	67,53	72,09	76,03	79,70	83,09	86,27	88,85	91,24	93,26	95,11	96,32	97,39	98,11
		0,940	1,332	1,400	1,588	1,585	1,355	1,087	0,519	0,221	0,403	0,301	0,321	0,281	0,148	0,540	0,144	0,312	0,228	0,105	0,195
Relekti 1	1	12,58	27,17	37,76	46,00	53,45	59,88	64,97	69,42	73,71	77,29	80,74	84,01	86,98	89,69	91,83	93,81	95,82	96,65	97,71	98,64
	2	12,09	26,51	37,11	45,49	52,82	58,76	63,91	68,61	73,28	76,93	80,69	83,98	87,41	89,86	92,21	94,01	95,82	96,90	98,07	98,62
	3	12,11	26,64	37,26	45,86	53,17	59,12	64,25	69,06	73,49	77,18	80,35	83,91	87,02	89,71	92,21	94,20	95,56	96,83	97,71	98,43
Keskiarvo	Varm. väli	12,08	26,49	36,96	45,45	52,61	59,02	64,12	68,60	72,92	76,61	80,02	83,41	86,57	89,26	91,55	93,65	95,28	96,53	97,53	98,30
		0,445	0,561	0,546	0,423	0,507	0,918	0,869	0,651	0,345	0,286	0,341	0,082	0,381	0,155	0,259	0,313	0,219	0,207	0,334	0,186

MUSTEPARTIKKELIEN KOKOJAKAUMA (IMAGE ANALYSIS)															
ppm (mm ^2/m ^2)															
		kokoluokka (partikkelin halkaisija mm)													
		< 0,02	0,02–0,04	0,04–0,06	0,06–0,08	0,08–0,10	0,10–0,14	0,14–0,18	0,18–0,22	0,22–0,26	0,26–0,35	0,35–0,50	0,50–1,00	1,00–1,50	Yhteensä
A	syöttö	855,2	1788,0	639,0	257,0	94,4	72,7	29,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3736,1
	aksepti	690,8	1548,5	611,8	264,6	103,8	134,3	69,6	46,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3470,0
	erotustehokkuus (%)	19,2	13,4	4,3	-3,0	-10,0	-84,7	-133,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1
B	syöttö	543,2	1119,5	315,6	47,6	37,8	28,0	0,0	0,0	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2114,1
	aksepti	514,8	1083,8	353,5	49,5	34,6	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2064,2
	erotustehokkuus (%)	5,2	3,2	-12,0	-4,0	8,5	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
C	syöttö	737,8	1732,0	837,2	329,3	138,5	134,3	29,8	0,0	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3961,3
	aksepti	653,5	1611,1	799,3	310,3	85,0	111,9	39,8	0,0	46,6	36,1	0,0	0,0	0,0	3693,6
	erotustehokkuus (%)	11,4	7,0	4,5	5,8	38,6	16,7	-33,6	0,0	-108,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8
D	syöttö	912,5	2711,7	1157,6	435,9	198,2	156,6	39,8	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5627,8
	aksepti	864,4	2678,5	1138,2	413,1	276,6	156,6	69,6	15,5	0,0	36,1	0,0	0,0	0,0	5648,6
	erotustehokkuus (%)	5,3	1,2	1,7	5,2	-39,6	0,0	-74,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4
E	syöttö	443,1	2270,8	1360,6	424,5	185,7	156,6	89,5	15,5	22,4	36,1	0,0	0,0	0,0	5004,8
	aksepti	431,9	2292,8	1350,9	462,6	182,5	145,4	109,4	15,5	0,0	36,1	0,0	0,0	0,0	5027,1
	erotustehokkuus (%)	2,5	-1,0	0,7	-9,0	1,7	7,2	-22,2	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4
F	syöttö	628,6	1660,0	978,9	454,9	169,9	195,8	99,4	31,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4218,6
	aksepti	503,0	1366,3	793,5	373,1	182,5	111,9	59,7	31,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3421,1
	erotustehokkuus (%)	20,0	17,7	18,9	18,0	-7,4	42,8	39,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,9
G	syöttö	676,2	2497,4	1384,9	538,7	198,2	78,3	59,7	0,0	0,0	36,1	0,0	0,0	0,0	5469,5
	aksepti	469,7	1828,2	1160,6	384,5	138,5	145,4	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4166,7
	erotustehokkuus (%)	30,5	26,8	16,2	28,6	30,1	-85,7	33,3	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	23,8
H	syöttö	515,3	1433,8	842,0	346,4	182,5	151,0	9,9	15,5	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3518,8
	aksepti	496,6	1301,7	748,8	287,4	125,9	111,9	59,7	15,5	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3169,9
	erotustehokkuus (%)	3,6	9,2	11,1	17,0	31,0	25,9	-503,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,9
I	syöttö	305,9	840,8	563,3	298,9	113,3	128,7	29,8	0,0	0,0	36,1	0,0	0,0	0,0	2316,8
	aksepti	287,9	823,0	473,9	230,3	113,3	123,1	39,8	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2106,4
	erotustehokkuus (%)	5,9	2,1	15,9	23,0	0,0	4,4	-33,6	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	9,1
0 - koe	syöttö	141,4	335,6	219,5	158,0	85,0	78,3	59,7	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1093,0
	aksepti	125,3	276,6	195,2	102,8	59,8	78,3	29,8	31,1	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	921,3
	erotustehokkuus (%)	11,4	17,6	11,1	34,9	29,6	0,0	50,1	-100,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,7

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö A	1	13	16	4	5	3	0	0
	2	18	6	4	4	0	0	0
	3	12	11	8	3	0	0	1
	4	7	10	5	4	1	0	0
	5	1	4	2	1	2	1	0
Keskiarvo		10	9	5	3	1	0	0
Varm. väli		8,028	5,805	2,724	1,885	1,621	0,556	0,556
Aksepti A	1	15	11	1	5	0	0	0
	2	10	5	5	6	0	0	1
	3	15	8	3	3	0	1	0
	4	48	32	27	14	0	0	0
	5	17	10	7	7	2	0	1
Keskiarvo		21	13	9	7	0	0	0
Varm. väli		19,038	13,373	13,087	5,201	1,112	0,556	0,681
Rejekt A	1	21	15	3	2	0	0	0
	2	8	10	9	2	2	0	0
	3	3	4	3	4	1	0	0
	4	7	4	4	2	0	0	0
	5	19	8	6	3	0	0	1
Keskiarvo		12	8	5	3	1	0	0
Varm. väli		9,852	5,724	3,170	1,112	1,112	0,000	0,556

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö B	1	12	14	5	1	6	1	0
	2	11	18	4	4	8	1	0
	3	27	56	30	23	13	3	1
	4	14	11	3	5	3	1	0
	5	9	25	12	6	7	2	1
Keskiarvo		15	25	11	8	7	2	0
Varm. väli		8,905	22,643	14,049	10,817	4,534	1,112	0,681
Aksepti B	1	4	16	2	4	1	2	0
	2	10	16	13	5	10	1	1
	3	24	41	20	16	5	0	0
	4	4	16	3	9	4	0	1
	5	7	19	12	5	8	1	0
Keskiarvo		10	22	10	8	6	1	0
Varm. väli		10,342	13,579	9,345	6,179	4,360	1,040	0,681
Rejekt B	1	9	7	3	5	3	1	0
	2	11	19	15	9	9	3	1
	3	12	19	9	9	6	0	0
	4	13	14	9	9	5	1	1
	5	15	27	6	15	8	1	0
Keskiarvo		12	17	8	9	6	1	0
Varm. väli		2,780	9,153	5,532	4,448	2,968	1,362	0,681

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö C	1	42	23	13	6	0	0	0
	2	31	14	5	1	0	1	0
	3	16	7	4	2	1	0	0
	4	46	36	46	30	4	1	0
	5	10	13	8	15	1	1	0
Keskiarvo		29	19	15	11	1	1	0
Varm. väli		19,579	14,027	21,844	15,007	2,043	0,681	0,000
Aksepti C	1	43	36	23	7	1	2	0
	2	24	8	11	1	0	0	0
	3	34	20	9	0	1	0	1
	4	55	45	27	19	2	0	0
	5	29	18	17	12	5	0	0
Keskiarvo		37	25	17	8	2	0	0
Varm. väli		15,252	18,474	9,533	9,844	2,391	1,112	0,556
Rejekti C	1	42	29	17	5	1	0	0
	2	18	10	7	5	0	0	1
	3	24	24	10	4	0	0	0
	4	49	35	13	4	0	0	1
	5	28	27	16	14	1	0	0
Keskiarvo		32	25	13	6	0	0	0
Varm. väli		16,028	11,563	5,171	5,318	0,681	0,000	0,681

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö D	1	14	2	8	5	1	1	0
	2	21	13	11	12	2	1	0
	3	13	8	7	9	0	0	0
	4	5	8	8	4	2	0	1
	5	23	17	6	8	0	0	0
Keskiarvo		15	10	8	8	1	0	0
Varm. väli		8,896	7,066	2,326	3,990	1,243	0,681	0,556
Aksepti D	1	9	7	7	4	1	0	0
	2	12	7	6	7	1	0	0
	3	14	11	13	9	1	0	0
	4	14	5	9	4	0	0	0
	5	20	12	9	5	2	2	0
Keskiarvo		14	8	9	6	1	0	0
Varm. väli		5,004	3,688	3,336	2,695	0,879	1,112	0,000
Rejekti D	1	48	29	18	14	0	0	0
	2	15	18	12	5	2	0	0
	3	9	13	4	7	2	0	0
	4	18	8	5	5	1	0	0
	5	33	13	9	10	2	0	0
Keskiarvo		25	16	10	8	1	0	0
Varm. väli		19,630	9,923	7,066	4,767	1,112	0,000	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö E	1	5	4	4	2	1	0	0
	2	16	14	1	6	0	0	0
	3	24	10	8	3	0	0	1
	4	7	5	4	1	0	0	0
	5	18	9	5	4	2	0	0
Keskiarvo		14	8	4	3	1	0	0
Varm. väli		9,829	5,019	3,121	2,391	1,112	0,000	0,556
Aksepti E	1	5	8	7	5	1	0	0
	2	13	6	3	5	0	0	0
	3	2	4	6	2	0	0	0
	4	5	5	4	0	0	0	0
	5	8	8	1	5	0	0	0
Keskiarvo		7	6	4	3	0	0	0
Varm. väli		5,171	2,224	2,968	2,862	0,556	0,000	0,000
Rejekti E	1	10	6	7	5	0	0	0
	2	10	7	8	2	0	1	0
	3	11	16	5	3	1	0	0
	4	8	2	11	1	2	0	0
	5	7	2	5	1	1	1	0
Keskiarvo		9	7	7	2	1	0	0
Varm. väli		2,043	7,120	3,096	2,080	1,040	0,681	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04–0,15	0,15–0,40	0,40–1,0	1–5	5–10	10–15	15–20
Syöttö F	1	21	9	8	6	1	0	1
	2	9	10	10	3	0	0	0
	3	13	14	8	2	1	0	0
	4	22	16	13	5	1	1	0
	5	42	32	13	6	0	0	0
Keskiarvo		21	16	10	4	1	0	0
Varm. väli		15,839	11,543	3,121	2,258	0,681	0,556	0,556
Aksepti F	1	8	10	4	9	2	1	0
	2	15	5	5	9	1	0	0
	3	11	15	10	4	1	0	1
	4	27	14	7	9	3	1	0
	5	32	15	14	11	3	0	0
Keskiarvo		19	12	8	8	2	0	0
Varm. väli		12,938	5,376	5,050	3,242	1,243	0,681	0,556
Rejekti F	1	19	14	8	1	0	0	0
	2	25	16	4	3	1	0	0
	3	22	18	14	4	0	0	0
	4	44	36	21	15	2	0	0
	5	33	21	20	14	0	0	0
Keskiarvo		29	21	13	7	1	0	0
Varm. väli		12,513	10,910	9,203	8,181	1,112	0,000	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04–0,15	0,15–0,40	0,40–1,0	1–5	5–10	10–15	15–20
Syöttö G	1	6	4		1	0	0	1
	2	10	7	4	1	0	0	0
	3	8	3	5	3	0	0	0
	4	9	4	3	2	0	0	0
	5	3	5	3	1	0	0	1
Keskiarvo		7	5	3	2	0	0	0
Varm. väli		3,450	1,885	1,190	1,112	0,000	0,000	0,681
Aksepti G	1	8	9	8	1	0	0	0
	2	2	8	5	4	0	0	0
	3	12	12	4	4	0	0	0
	4	11	7	7	6	0	0	0
	5	11	6	5	3	0	0	0
Keskiarvo		9	8	6	4	0	0	0
Varm. väli		5,081	2,862	2,043	2,258	0,000	0,000	0,000
Rejektit G	1	6	3	3	0	0	0	0
	2	9	5	4	3	1	0	0
	3	16	8	2	2	0	0	0
	4	41	7	3	3	0	0	0
	5	17	5	1	1	2	0	0
Keskiarvo		18	6	3	2	1	0	0
Varm. väli		17,124	2,424	1,418	1,621	1,112	0,000	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04–0,15	0,15–0,40	0,40–1,0	1–5	5–10	10–15	15–20
Syöttö H	1	7	5	3	3	1	0	0
	2	19	14	10	7	0	0	0
	3	8	8	5	5	0	0	0
	4	16	13	10	1	1	0	0
	5	11	7	6	3	0	1	0
Keskiarvo		12	9	7	4	0	0	0
Varm. väli		6,424	4,863	3,872	2,835	0,681	0,556	0,000
Aksepti H	1	11	11	9	7	0	0	0
	2	10	12	4	9	0	0	0
	3	13	9	5	4	1	0	0
	4	28	6	13	3	0	0	0
	5	8	13	9	2	0	0	0
Keskiarvo		14	10	8	5	0	0	0
Varm. väli		9,985	3,450	4,483	3,625	0,556	0,000	0,000
Rejektit H	1	13	11	9	6	2	0	0
	2	10	4	5	7	0	0	0
	3	15	10	4	6	1	0	0
	4	11	7	6	2	0	0	0
	5	12	14	6	10	0	0	0
Keskiarvo		12	9	6	6	1	0	0
Varm. väli		2,391	4,767	2,326	3,560	1,112	0,000	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
Syöttö I	1	1	3	1	0	0	0	0
	2	3	5	2	3	1	0	0
	3	7	6	4	1	0	0	0
	4	2	0	3	1	0	0	0
	5	4	2	9	2	0	0	0
Keskiarvo		3	3	4	1	0	0	0
Varm. väli		2,862	2,968	3,872	1,418	0,556	0,000	0,000
Aksepti I	1	0	2	3	5	1	0	0
	2	11	5	4	2	0	0	0
	3	5	2	1	5	0	0	0
	4	4	0	3	1	0	0	0
	5	11	4	3	4	0	0	0
Keskiarvo		6	3	3	3	0	0	0
Varm. väli		5,923	2,424	1,362	2,258	0,556	0,000	0,000
Rejekti I	1	3	2	2	0	0	0	0
	2	2	2	4	2	0	0	0
	3	5	3	1	4	0	0	0
	4	6	2	4	3	0	0	0
	5	3	1	2	0	0	1	0
Keskiarvo		4	2	3	2	0	0	0
Varm. väli		2,043	0,879	1,668	2,224	0,000	0,556	0,000

Tahmo-analyysi		Kokoluokat, mm						
Varm. väli +/- 5 %		0,04-0,15	0,15-0,40	0,40-1,0	1-5	5-10	10-15	15-20
0-koe								
Syöttö	1	39	23	14	4	0	1	0
	2	88	33	18	8	0	0	0
	3	20	3	11	4	0	1	1
Keskiarvo		49	20	14	5	0	1	0
Varm. väli		56,314	24,517	5,637	3,707	0,000	0,927	0,927
Aksepti	1	257	52	3	1	0	0	0
	2	87	18	4	3	0	0	0
	3	34	16	5	3	0	0	0
Keskiarvo		126	29	4	2	0	0	0
Varm. väli		186,992	32,473	1,605	1,853	0,000	0,000	0,000
Rejekti	1	37	16	7	13	1	0	1
	2	99	34	10	7	2	0	1
	3	60	17	6	2	0	0	0
Keskiarvo		65	22	8	7	1	0	1
Varm. väli		50,305	16,237	3,341	8,840	1,605	0,000	0,927

Siistauskemikaalien pintajännitysmittauksset										
Pintajännitys (mN/m)	A				Kemikaali				0-KOE	
		B	C	D	E/F	G	H	I		
Puhdas kemikaaliliuos	54,76	40,22	44,54	52,37	43,02	32,17	38,05	35,73		72,20
Massa + siistauskemikaali										
– Sentrifugointi	45,72	43,22	40,94	41,85	40,1	36,37	38,14	34,41		41,5
– Sentrifugointi + suodatus	50,48	48,08	44,58	45,68	46,57	41,95	41,56	35,61		42,68

Outokumpu –laboratoriovaahdotusten olosuhteet ja tulokset											
Lämpötila (°C)				pH		kovuus (dH°)		Vaaleus (ISO)		Rejekti	Kokonaisrejekti Rw (%)
								Syöttö	Aksepti		
A	1	45	9,0	20,0	50,6	55,6	33,0				9,3
	2	45	9,0	20,0	50,6	55,2	32,3				8,7
	3	45	9,0	20,0	49,8	54,7	31,4				9,7
B	1	45	9,0	14,0	52,7	57,9	31,8				7,1
	2	45	9,0	14,0	52,9	57,1	30,5				5,9
	3	45	9,0	14,0	52,9	56,3	28,0				5,5
C	1	45	8,8	17,0	49,8	53,7	21,7				3,9
	2	45	8,8	17,0	49,5	53,7	20,4				3,9
	3	45	8,8	17,0	49,4	53,6	20,5				4,2
D	1	45	8,3	6,0	49,5	53,8	25,2				4,3
	2										
	3										
E	1	45	9,5	5,0	52,9	55,9	35,3				10,0
	2	45	9,5	5,0	52,9	55,9	29,5				7,0
	3	45	9,5	5,0	52,2	56,5	26,9				6,1
F	1	45	9,5	5,0	46,2	51,8	26,9				11,6
	2	45	9,5	5,0	46,8	52,0	26,9				9,7
	3	45	9,5	5,0	46,2	52,8	27,5				10,7
G	1	45	9,5	9,0	50,4	60,0	33,5				25,3
	2	45	9,5	9,0	50,4	60,2	33,9				24,6
	3	45	9,5	9,0	50,9	59,5	35,1				24,8
H	1	45	9,5	1	52,3	54,5	37,2				15,5
	2	45	9,5	1	52,1	57	37,3				14,3
I	1	45	9,5	1	55,5	58,4	41,8				9,1
	2	45	9,5	1	55,7	58,7	39,4				8

Koeajojen orgaanisen- ja epäorgaanisen aineksen rejektoitumisasteet on laskettu seuraavia kaavoja käyttäen:

rejektoituneen epäorgaanisen aineen osuus:

$$\frac{(R_{FL} \times R_C \times R_A)}{(F_{FL} \times F_C \times F_A)} \times 100\%$$

rejektoituneen orgaanisen aineen osuus:

$$\frac{R_{FL} \times R_C \times (1 - \frac{R_A}{100})}{F_{FL} \times F_C \times (1 - \frac{F_A}{100})} \times 100$$

joissa	R_{FL} ja F_{FL}	ovat	rejekti- ja syöttövirtaus
	R_C ja F_C		rejekti- ja syöttövirtauksen sakeus
	R_A ja F_A		rejektin syötön tuhkapitoisuus

DIPLOMITYÖHÖN LIITETYT LISÄKOKEET

1. LISÄKOKEIDEN TAVOITE JA TOTEUTUS

Näillä lisäkokeilla pyrittiin selvittämään miksi Keräyskuitu Oy:llä ajetuissa esikokeissa saatiin huomattavasti parempia tuloksia kuin varsinaisissa diplomityön koeajoissa eri siistauskemikaaleilla. Tähän vaikuttaneita syitä olivat mahdollisesti erilaiset olosuhteet keräyskuitu Oy:n ja FFRC:n koehallin välillä sekä rakenteelliset erot koeajoissa käytettyjen muovi- ja teräskuorisen GSC-hydrosyklonin kesken. Keräyskuitu Oy:llä kiertovesiin rikastuneet hienoaineet ja vaahdotuskemikaalit lisäävät massasulpun vaahtoamista ja parantavat täten myös GSC:n erotustehokkuutta. Toisaalta teräskuorinen GSC on 250 mm lyhyempi kuin muovikuorinen malli, jolla voi myös olla vaikutusta laitteen erotustehokkuuteen.

Kokeissa vertailtiin koeajoissa käytettyjen GSC-hydrosyklonien toimintaa keskenään sekä Keräyskuitu Oy:n käyttämiin Outokumpu-vaahdotuskennoihin. Lisäkokeet ajettiin FFRC:n tiloissa Keräyskuitu Oy:ltä tuotua massaa käyttäen. Massaa noudettaessa otettiin myös näytteet Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennoilta, jolloin voitiin olettaa massojen olleen suhteellisen samanlaisia kaikissa koeajoissa ja vertailla siten eri vaahdotusmenetelmiä keskenään. Outokumpu-kennoilta saatu vertailunäyte otettiin kennojen syöttölinjan ja Keräyskuitu Oy:n ensimmäisen primääriportaan yli, jolloin massa on kulkenut neljän Outokumpu-kennon läpi. Kaikkiaan Keräyskuitu Oy:n vaahdotussysteemi käsittää 14 Outokumpu-kennoa.

Koeajoissa käytetty massa otettiin Keräyskuitu Oy:n linjasta välittömästi pulpperoinnin ja korkeasakeuspyörrepuhdistimen jälkeen, jolloin sen sakeus oli noin 4,0 %. Massa laimennettiin FFRC:ssä 2,0 %:ksi ja jaettiin sen jälkeen tasan kahteen eri säiliöön, joista toisen sisältöä käytettiin teräskuorisen GSC:n koeajossa ja toisen testattaessa muovikuorista hydrosyklonia.

Koeajot aloitettiin annostelemalla toiseen syöttösäiliöön vaahdotuskemikaaliksi 2,0 % Keräyskuitu Oy:n käyttämää emulsiota ja annettiin kemikaalin sekoittua massaun noin tunnin ajan, jonka jälkeen ajettiin koeajo teräskuorisella GSC:llä. Ajossa käytettiin samoja optimiajoparametrejä kuin varsinaisissa diplomityön kokeissa. Ensimmäisen koeajon jälkeen vaihdettiin telineeseen muovikuorinen GSC ja annosteltiin sille varattuun massaun yhtä suuri määrä samaa emulsiota kuin edellä. Kemikaalin sekoittumiselle varatun tunnin viiveen jälkeen ajettiin muovikuorisen GSC:n koeajo samoissa olosuhteissa ja samoilla ajoparametreillä kuin edellä. Tavoitteena oli siis verrata käytettyjen hydrosyklonien toimintaa mahdollisimman samankaltaisissa oloissa, jolloin syklonien väliset erot saataisiin esiin. Koeajoissa vallinneet olosuhteet on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Muovi- ja teräskuorisen GSC-hydrosyklonin koeajoissa vallinneet olosuhteet.

Mitattu suure	Muovikuorinen GSC	Teräskuorinen GSC
Massavirtaus (l/min)	750	750
Syöttösakeus (%)	1,9	2,0
Akseptisakeus (%)	1,9	2,1
Rejektisakeus (%)	1,8	1,4
Rejektisuhde R_r (%)	11,7	11,6
Ilmavirtaus (l/min)	1125	1125
pH	9,0	9,0
Lämpötila (°C)	48	48
Kovuus (°dH)	17	17
Massan syöttöpaine (kPa)	71	72
Ilman syöttöpaine (kPa)	150	150

2. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Jo koeajojen aikana huomattiin hydrosyklonien käyttäytymisen ja toimintatehokkuuksien poikkeavan huomattavasti toisistaan. Tämä ilmeni selvästi heikompana vaahtoamisena muovikuorista GSC:tä käytettäessä, jolloin laitteen erotustehokkuus muodostui teräskuorista hydrosyklonia heikommaksi. Myöhemmissä tarkasteluissa todettiin heikon vaahtoamisen johtuneen Keräyskuitu Oy:llä tehtyjen koeajojen yhteydessä syklonin huokoisuuden putken sisäpinnalle kertyneistä massa- ja kalsiumkerrostumista, jotka ovat syntyneet todennäköisesti Keräyskuitu Oy:llä tapahtuneen paineilmakompressorin hajoamisen yhteydessä. Näin ollen saatujen tulosten perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä hydrosyklonien rakenteellisten erojen vaikutuksista niiden tehokkuuksiin, joten muovikuorisella GSC:llä saadut tulokset jätetäänkin tässä yhteydessä käsittelemättä.

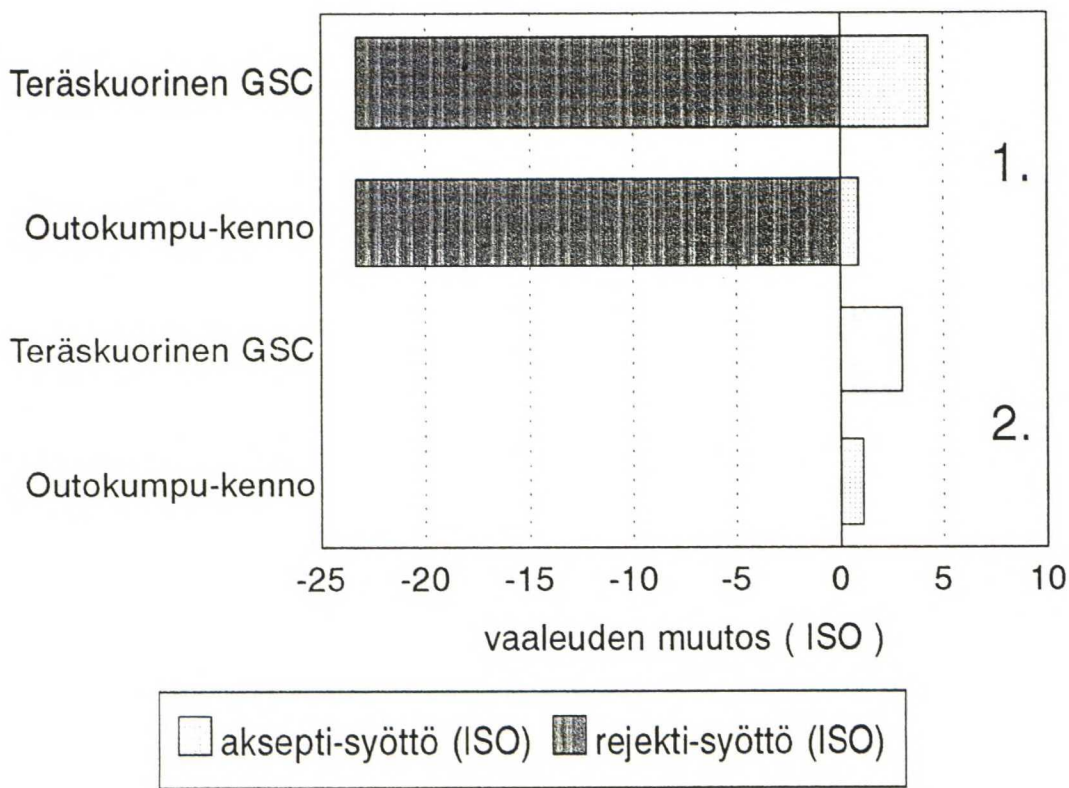
Koeajojen näytteille suoritetuista analyyseistä saadut mittausarvot on esitetty tämän liitteen sivuilla 10 - 12.

2.1 Massan optiset ominaisuudet

Mittausten yhteydessä vertailtiin myös kahden eri vaaleusarkkien valmistusmenetelmän vaikutusta mittaustuloksiin. Ensinnäkin vaaleus määritettiin aivan samoin kuin diplomityön koeajoissakin standardin SCAN-C21:75 mukaisesti Büchner-suppilossa suodatetuista massakakuista. Näiden lisäksi vaaleus mitattiin kiertovesiarkkimuotissa valmistetuista arkeista, jolloin voitiin seurata massan seassa olevan hienoaineksen vaikutusta mittauksen lopputulokseen. Kiertovesiarkeista määritettiin myös valonsironta- ja -absorptiokertoimet, joiden on todettu vaikuttavan massan vaaleuteen.

Koeajoissa saadut vaaleuden muutokset on esitetty kuvassa 1. Tulokset osoittavat teräskuorisen GSC:n toimineen tällä kertaa huomattavasti paremmin kuin diplomityön koeajoissa ja saavutetut vaaleuden muutokset olivatkin suhteellisen hyviä. Tähän oli syynä kemikaalin korkeammasta annoksesta sekä Keräyskuitu Oy:n massan mukana tulleesta

hienoaineksesta johtuva moninkerroin runsaampi vaahtoaminen kuin diplomityön koeajoissa. Sen sijaan keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennolla saavutettuun heikkoon akseptivaaleuden nousuun on todennäköisesti vaikuttanut edustavan näytteen ottoon liittyvät vaikeudet, sillä akseptinäyte joudutaan koukkimaan kennon päältä pitkävartisella kauhalla, jolloin näytteeseen tulee myös jo kennon pinnalle erottuneita mustepartikkeleita.



KUVA 1. Teräskuorisella GSC:llä ja Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennolla saavutetut vaaleuden muutokset määritettynä sekä (1.) Büchner-suppilossa että (2.) kiertovesiarkkimuotissa valmistetuista arkeista.

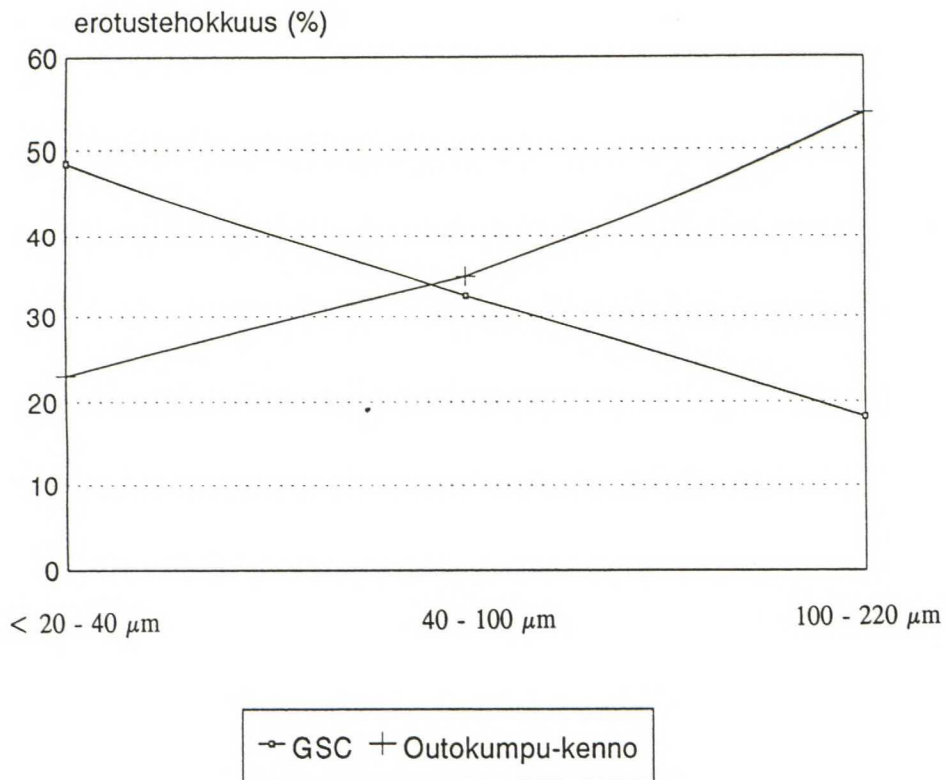
Kiertovesiarkkimuotissa valmistetut arkit antavat edustavimman kuvan massasta, josta ne on valmistettu, sillä massassa olevat hienoaineet eivät ole suotautuneet arkintekovaiheessa viiran läpi vaan ne on saatu suurelta osin mukaan arkkiin. Näiden hienoaineiden vaikutus on parhaiten nähtävissä tämän liitteen sivulla 10 olevassa taulukossa, jossa kiertovesiarkki-

muotissa valmistetuista arkeista määritetyt syöttö- ja akseptivaaleudet ovat jokaisessa pisteessä noin kaksi yksikkö korkeampia kuin Büchner-suppilossa valmistetuista massakuista mitatut arvot. Tähän on syynä hienoaineuksen mukana olosta johtuva korkeampi valonsironta- ja absorptiokerroin, jonka vaikutuksesta arkki näyttää vaaleammalta.

Sama ilmiö on havaittavissa GSC:n ja Outokumpu-kennon syöttömassoja vertailtaessa, jolloin todetaan Outokumpu-kennon syöttömassan tuhkapitoisuuden olleen hieman korkeampi kuin GSC:llä ajetun massan. Tällöin voidaan havaita korkeamman tuhkapitoisuuden ja siten suuremman hienoaineuksen määrän nostaneen valonsirontakerrointa ja siten myös massan vaaleutta. Vertailtaessa kuitenkin eri vaahdotusmenetelmien vaikutusta massan valonsironta- ja -absorptiokertoimiin, on selvin ero on havaittavissa valonabsorptiokertoimen kohdalla, joka laskee selvästi GSC:n syöttö- ja akseptimassojen välillä johtuen GSC:n voimakkaasta taipumuksesta poistaa erityisesti massasulpussa olevaa hienoainesta. Outokumpu-kennolla tämä absorptiokertoimen lasku ei ole aivan yhtä voimakasta, joka voi osaltaan vaikuttaa edullisesti perinteisellä kennolla saatuihin vaaleuden muutoksiin.

2.2 Erikokoisten partikkelien erotustehokkuus

Teräskuorisella GSC:llä saavutetut hyvät vaaleuden muutokset antoivat myös odottaa erinomaisia erotustehokkuuksia erityisesti juuri pienten halkaisijaltaan alle $40\text{ }\mu\text{m}$ olevien partikkelien osalta, näiden vaikuttaessa eniten massan vaaleuteen. Erikokoisten partikkelien erotustehokkuuksista piirretyt kuvaajat on esitetty kuvassa 2.

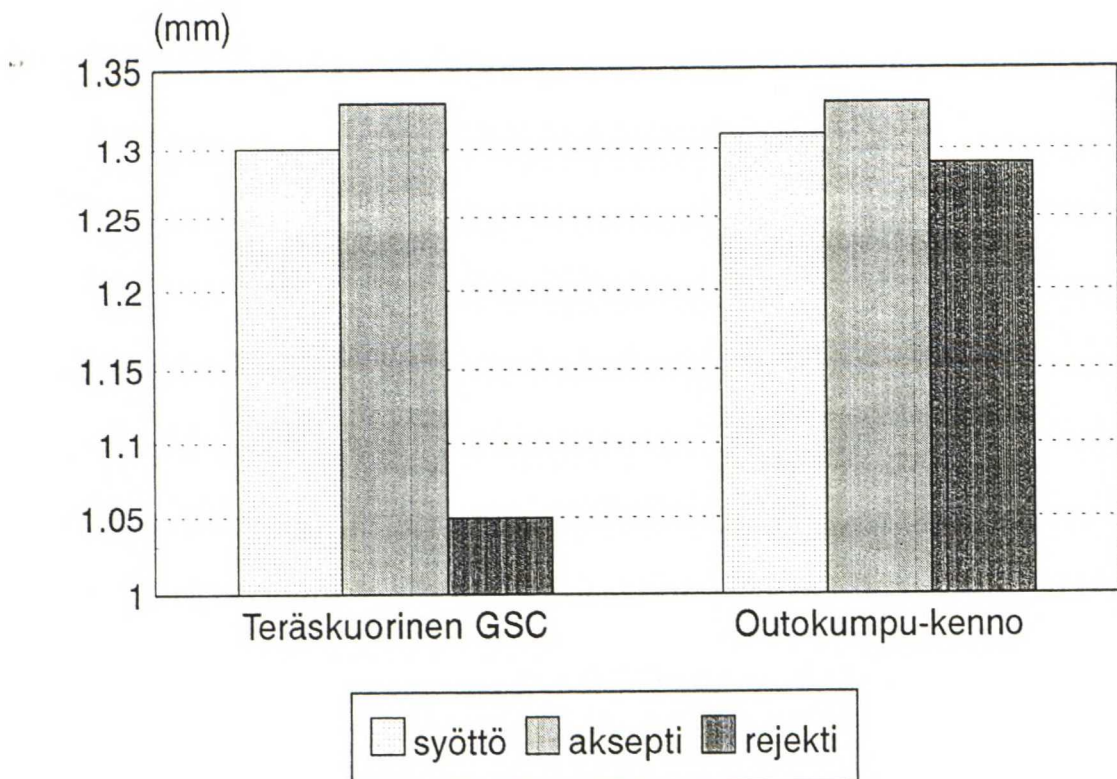


KUVA 2. Teräskuorisella GSC:llä ja Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennolla saadut erikokoisten partikkelien erotustehokkuudet.

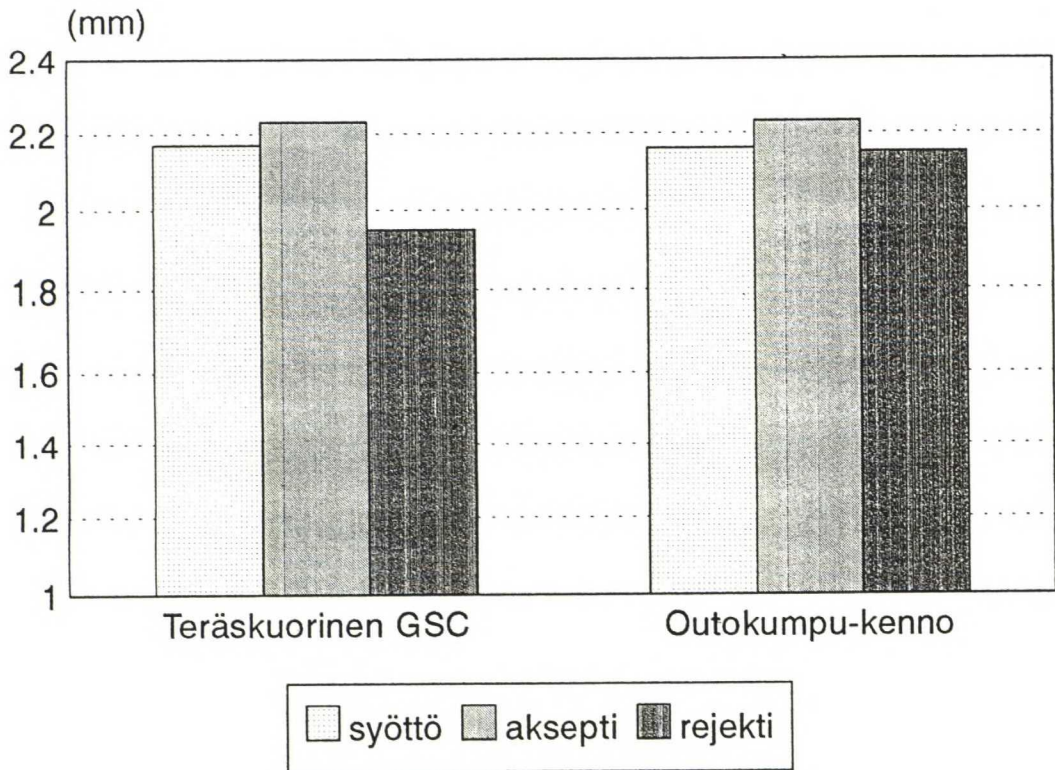
Kuvaajista nähdään selvästi miten erilaisista vaahdotusmenetelmistä on kyse ja varsinkin kuinka radikaalisti niissä vallitsevat olosuhteet poikkeavat toisistaan. GSC:ssä voimakas keskipakovoimakenttä johtaa pienten ja kevyiden epäpuhtauspartikkelien rejektoitumiseen, kun taas perinteisissä kennoissa erotustehokkuus on puolestaan enemmänkin riippuvainen painovoimasta sekä partikkelien ja ilmakuplien välisistä hydrodynaamisista voimista. Hydrodynaamisista voimista johtuen kaikkein pienimmät partikkelit eivät pääse riittävän lähelle niitä huomattavasti suurempia ilmakuplia, eivätkä näin ollen kykene kiinnittymään kuplien pintoihin. Tästä syystä perinteisessä vaahdotuksessa pienten partikkelien erotustehokkuus jää huomattavasti alhaisemmaksi kuin hydrosyklonin olosuhteissa, mistä johtuen on myös GSC:llä saavutettu vaaleuden muutos syötön ja akseptin välillä perinteistä kennoa parempi.

2.3 Kuidunpituusjakauma

Kuidunpituusmittausten tulokset on esitetty kuvissa 3 ja 4. GSC:n osalta saadut tulokset vahvistavat jo diplomityössä tehtyä havaintoa, jonka mukaan rejektoitunut kuitumateriaali koostuu lähinnä lyhyistä ja kevyistä kuiduista. Tällä kertaa on kuitenkin huomattava kemikaalin runsaammasta vaahtoamisesta johtuen rejektijakeen sisältävän vieläkin lyhyempää ja kevyempää kuitumateriaalia kuin diplomityön koeajoissa. Eli toisin sanoen, runsaamman vaahtoamisen myötä hyvien kuitujen rejektoituminen vähenee entisestään, rejektijakeen koostuessa lähinnä lyhyistä nollakuiduista ja muusta hienoaineksesta. Tämän hienoaineksen poistaminen on lopputuotteen laadun kannaltakin pelkästään eduksi.



KUVA 3. Teräskuorisen GSC:n ja Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennon syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä mitatut pituudella painotetut kuidun keskipituudet.



KUVA 4. Teräskuorisen GSC:n ja Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennon syöttö-, aksepti- ja rejektinäytteistä mitatut painolla painotetut kuidun keskipituudet.

Outokumpu-kennolta rejektoitunut kuitumateriaali ei sen sijaan suuremmin eroa kennoon syötetyistä kuiduista, vaan GSC:tä huomattavasti heikommista erottavista voimista johtuen rejektijakeeseen joutuu myös aivan hyviä ja käyttökelpoisia kuituja. Näin ollen voidaan todeta GSC:n erotustehokkuuden olevan myös tältä osin perinteistä vaahdotusta parempi.

3. YHTEENVETO

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että diplomityön koeajoissa vallinneet olosuhteet eivät olleet GSC:n toimintatehokkuuden kannalta lähelläkään parhaita mahdollisia. Suurin merkitys oli todennäköisesti sillä, että käytetyt kemikaaliannokset olivat GSC:n optimaalisen toiminnan kannalta aivan liian pieniä, jolloin liian alhaisesta vaahdotamisesta johtuen saadut erotustehokkuudet jäivät heikoiksi. Diplomityön aikana saatuja tuloksia ja kokemuksia hyödyntäen pyrittiinkin näissä kokeissa käyttämään GSC:lle parem-

min sopivia olosuhteita, jolloin tässä teräskuorisella GSC:llä tehdyssä lisäkokeessa suurempi kemikaaliannos johti myös runsaampaan vaahtoamiseen ja paransi laitteen tehokkuutta merkittävästi. Toisin sanoen käytetyissä olosuhteissa teräskuorisen syklonin toiminta oli selvästi lähempänä optimitilannetta kuin kertaakaan aikaisemmin.

Näissäkin kokeissa jäi edelleen epäselväksi muovi- ja teräskuorisen hydrosyklonin rakenteellisten erojen mahdolliset vaikutukset niiden toimintatehokkuuksiin. On kuitenkin huomattava, että esikokeissa saadut hyvät tulokset ajettiin muovikuorisella yksiköllä, kun taas näissä lisäkokeissa teräskuorinen sykloni toimi lähestulkoon yhtä tehokkaasti. Näin ollen laitteen toiminta ei ehkä olekaan niin suuresti riippuvainen edellämainituista rakenteellisista eroista vaan eniten siihen vaikuttavat juuri ajossa vallitsevat olosuhteet.

Hydrosyklonille sopivia ajo-olosuhteita käytettäessä saatiin sillä myös selvästi parempia tuloksia kuin vertailukohteena toimineella Keräyskuitu Oy:n Outokumpu-kennolla. Näin ollen nämä lisäkokeet osoittivat aivan samoin kuin ennen diplomityötä ajetut esikokeetkin, että hydrosyklonin tyyppinen musteenpoistomenetelmä on vertailukelpoinen vaihtoehto perinteisille vaahdotuskennoille.

Diplomityön lisäkokeissa määritetyt massojen optiset ominaisuudet.

Varm. väli +/- 5 %	Vaaleus (ISO)			Kiertovesiarkkimuotti			Neliömassa (g/m ²)		Valon absorptio – ja sirontakerroin (k)			
	Syöttö	Aksepti	Rejekt	Syöttö	Aksepti	Syöttö	Aksepti	Syöttö	Aksepti	Syöttö	Aksepti	Aksepti
muovikuorinen												
GSC												
1	47,4	47,7	44,3	49,3	49,4	56,5	56,0	13,4	11,4	64,5	57,0	
2	47,6	47,8	44,6	49,0	48,9	59,0	53,5	11,6	12,8	57,1	61,7	
3	47,4	47,9	44,7	49,1	49,7	57,5	59,0	12,0	11,1	58,7	56,5	
keskianvo	47,5	47,8	44,5	49,1	49,3			12,3	11,8	60,1	58,4	
Varm. väli	0,2	0,2	0,3	0,2	0,6			1,5	1,5	6,2	4,6	
Teräskuorinen												
GSC												
1	47,0	51,5	27,3	49,1	52,2	59,5	58,5	11,5	9,7	55,5	60,4	
2	47,4	51,4	27,7	49,4	52,2	61,5	55,0	12,3	9,4	60,5	58,5	
3	47,2	51,5	28,3	49,2	52,2	54,0	54,5	11,9	9,8	58,4	61,3	
Keskianvo	47,2	51,5	27,7	49,2	52,2			11,9	9,6	58,2	60,1	
Varm. väli	0,3	0,1	0,8	0,2	0,1			0,6	0,3	4,1	2,3	
Keräyskuitu Oy												
Outokumpu – kenno												
1	48,3	49,8	24,9	52,0	53,6	58,0	58,5	11,3	10,4	62,9	65,2	
2	48,6	49,1	25,3	52,2	52,8	59,5	59,0	11,3	10,9	63,9	64,6	
Keskianvo	48,5	49,4	25,1	52,1	53,2			11,3	10,7	63,4	64,9	
Varm. väli	0,4	1,0	0,7	0,3	1,1			0,0	0,8	1,3	0,9	

Diplomityön lisäkokeissa määritetyt massojen tuhkapitoisuudet ja kuidunpitoisuusjakauma.

Varm. väli +/- 5 %	Tuhkapitoisuus (%)			Kuidunpitoisuus (mm)					
	Syöttö	Aksepti	Rejekti	Pituudella painotettu			Painolla painotettu		
				Syöttö	Aksepti	Rejekti	Syöttö	Aksepti	Rejekti
muovikuorinen									
GSC									
1	14,18	13,93	15,94	1,37	1,35	1,31	2,21	2,20	2,18
2	13,49	13,68	16,04	1,32	1,39	1,27	2,14	2,27	2,13
3	12,77	13,92	15,95	1,33	1,28	1,28	2,20	2,14	2,14
keskiarvo	13,48	13,84	15,98	1,34	1,34	1,29	2,18	2,20	2,15
Varm. väli	1,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0
Teräskuorinen									
GSC									
1	14,26	12,10	38,24	1,25	1,30	1,04	2,11	2,14	1,89
2	14,33	12,02	37,23	1,32	1,36	1,06	2,18	2,23	1,90
3	14,56	12,35	36,92	1,34	1,34	1,05	2,23	2,22	1,91
Keskiarvo	14,38	12,16	37,46	1,30	1,33	1,05	2,17	2,20	1,90
Varm. väli	0,3	0,3	1,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Keräyskuitu Oy									
Outokumpu – kenno									
1	17,26	16,82	52,25	1,31	1,32	1,28	2,17	2,19	2,12
2	17,03	17,44	52,42	1,30	1,34	1,30	2,15	2,20	2,18
Keskiarvo	17,15	17,13	52,34	1,31	1,33	1,29	2,16	2,20	2,15
Varm. väli	0,3	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1

Diplomityön lisäkokeissa määritetyt erikokoisten partikkelien erotustehokkuudet.

MUSTEPARTIKKELIEN KOKOJAKAUMA (IMAGE ANALYSIS)															
ppm (mm ^2/m ^2)		kokoluokka (partikkelin halkaisija mm)													
		< 0,02	0,02–0,04	0,04–0,06	0,06–0,08	0,08–0,10	0,10–0,14	0,14–0,18	0,18–0,22	0,22–0,26	0,26–0,35	0,35–0,50	0,50–1,00	1,00–1,50	Yhteensä
Muovikuorinen															
GSC															
syöttö		645,4	7618,5	3362,2	1556,5	897,8	668,7	1204,7	173,4	107	115,2	111,8	0	0	16461,2
	aksepti	627,2	6629,4	2815,8	1298,6	682,1	677,7	1394,9	99,1	35,7	57,6	111,8	0	0	14429,9
erotustehokkuus (%)		2,8	13,0	16,3	16,6	24,0	-1,3	-15,8	42,8	66,6	50,0	0,0	0,0	0,0	12,3
Teräskuorinen															
GSC															
syöttö		745,8	8981,6	4232,2	2169,4	1103,4	1052,1	1902,2	247,7	142,7	0	0	0	0	20577,1
	aksepti	358,9	4641	2757	1468,5	842,6	936,2	1456,3	222,9	107	115,2	111,8	0	0	13019,4
erotustehokkuus (%)		51,9	48,3	34,9	32,3	23,6	11,0	23,3	10,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,7
Keräyskuitu Oy															
Outokumpu – kenno															
syöttö		593,7	6251,5	2693,5	1374,4	621,9	606,3	887,7	123,8	71,3	57,6	111,8	348,3	0	13741,8
	aksepti	487	4782,6	1854,5	828,3	371,1	294,2	380,4	74,3	71,3	57,6	0	0	0	9201,3
erotustehokkuus (%)		18,0	23,5	31,1	39,7	40,3	51,5	57,1	40,0	0,0	0,0	100,0	100,0	0,0	33,0

LUCASALINEN

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puunjalostustekniikan laitos
Kirjasto